McGraw-Hill Education

الفيزياء

نسخة الإمارات العربية المتحدة

للصف 12 العام

مجلد 3



Project: McGraw-Hill Education United Arab Emirates Edition Integrated Science Grade 12 Year 4 T3 Physics

FM. Front Matter, from Glencoe Physics: Principles & Problems ©2017
7. Electromagnetism, Chapter 26, from Glencoe Physics: Principles & Problems ©2017
8. Interference and Diffraction, Chapter 19, from Glencoe Physics: Principles & Problems ©2017
9. Quantum Theory, Chapter 27, from Glencoe Physics: Principles & Problems ©2017
EM. End Matter, from Glencoe Physics: Principles & Problems ©2017

صورة الغلاف: Westend61/Shutterstock.com

mheducation.com/prek-12



طُبع في دولة الإمارات العربية المتحدة.

رقم النشر الدولي: 978-1-44-701529-1 (نسخة الطالب)
MHID: 1-44-701529-0 (نسخة الطالب)
رقم النشر الدولي: 978-1-44-701531-4 (نسخة المعلم)
MHID: 1-44-701531-2 (نسخة المعلم)

النسخة الإلكترونية

رقم النشر الدولي: 978-1-44-701539-0 (نسخة الطالب)
MHID: 1-44-701539-8 (نسخة الطالب)
رقم النشر الدولي: 978-1-44-701541-3 (نسخة المعلم)
MHID: 1-44-701541-X (نسخة المعلم)

1 2 3 4 5 6 7 8 9 XXX 22 21 20 19 18 17

موجز المحتويات

الوحدة 7

تجربة استهلالية موجات البث الإذاعي

تجارب صغيرة الجسيمات المشحونة المتحركة

إشارات الموجة

مختبر الفيزياء كتلة الإلكترون

صدّ الموجات

الوحدة 8

تجربة استهلالية أنماط الضوء

تجارب صغيرة غشاء الصابون

محزوزات الحيود

شاشة عرض شبكية

مختبر الفيزياء الهولوغرامات

ما الطول الموجي؟

تداخل الشق المزدوج

الوحدة 9



الوحدة 7

الكهرومغناطيسية

الفكرة الرئيسة **ترتبط الموجات الكهرومغناطيسية وتتولد من تذبذب المجالات الكهربائية والمغناطيسية الناشئة عن تسارع الإلكترونات.**



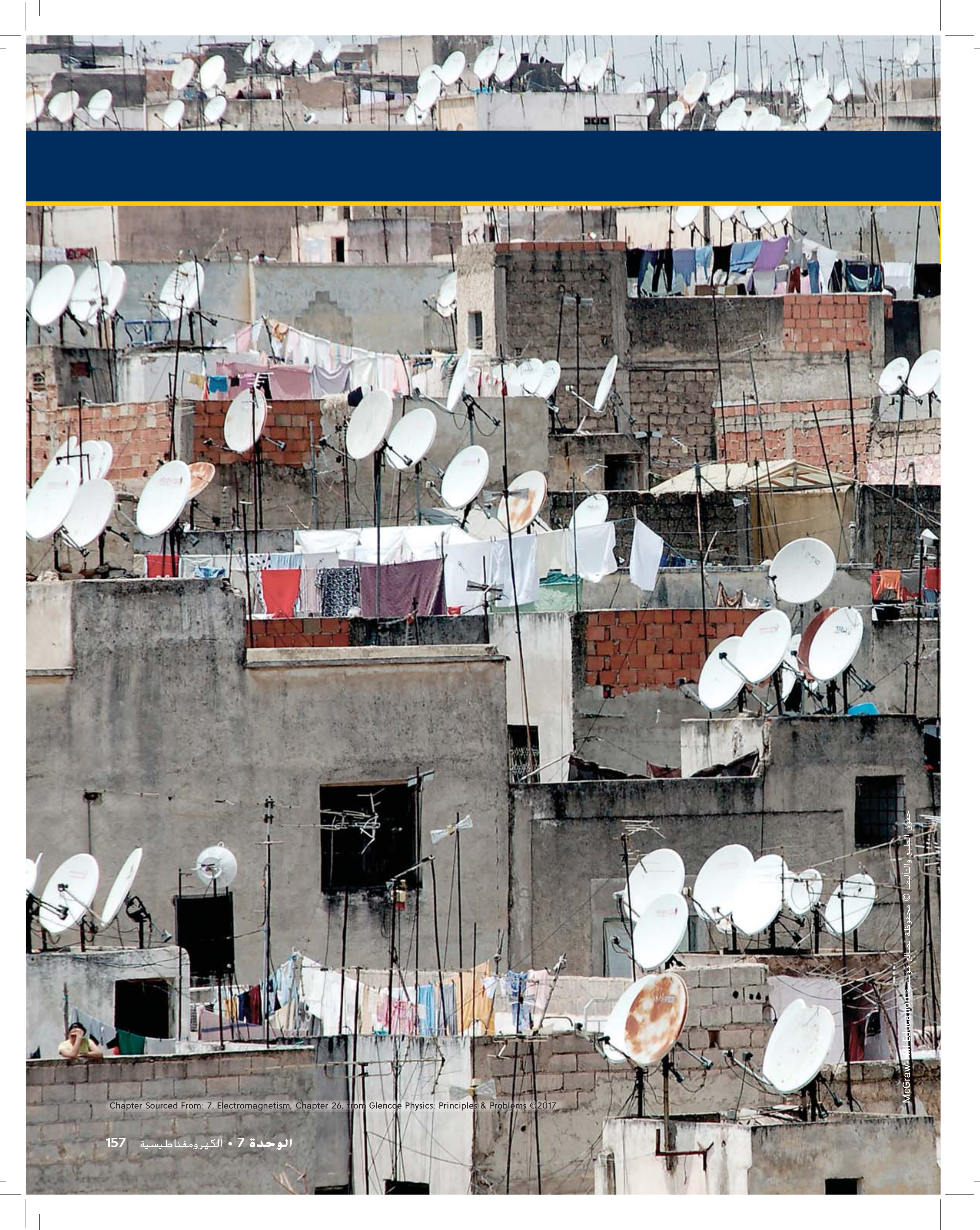
1 تأثير القوى الكهربائية والمغناطيسية على الجسيمات

2 المجالات الكهربائية والمغناطيسية في الفضاء

التجربة الاستهلالية

موجات البث الإذاعي

ما العلاقة بين شدة قوة إشارة الراديو والمسافة التي تقطعها؟



Chapter Sourced From: 7. Electromagnetism, Chapter 26, from Glencoe Physics: Principles & Problems ©2017

تأثير القوى الكهربائية والمغناطيسية على الجسيمات



الفيزياء في حياتك

تشير الأخاديد الموجودة على سطح المريخ إلى أن المياه كانت تتدفق عليه في زمن من الأزمنة. وهناك دليل آخر اكتشفه مطياف الكتلة الموجود على متن مركبة الفضاء التي هبطت على المريخ. فعند تعريض تربة المريخ وغازاته إلى المجالات الكهربائية والمغناطيسية لمطياف الكتلة، ظهرت إشارات دالّة على وجود الماء.

الفكرة الرئيسة

يمكن استخدام انحراف الجسيمات المتحركة في المجالات الكهربائية والمغناطيسية لمعرفة خصائص هذه الجسيمات.

الأسئلة الرئيسة

- كيف استطاع فيزيائيو القرن التاسع عشر قياس نسبة الشحنة إلى الكتلة وقياس كتلة الإلكترون؟
- كيف يمكنك تحديد سرعة الجسيمات في المجالات الكهربائية والمغناطيسية، وكيف يمكنك إيجاد نسبة شحنة هذه الجسيمات إلى كتلتها؟
- كيف يقوم مطياف الكتلة بفصل الأيونات ذات الكتل المختلفة؟

مراجعة المفردات

قانون نيوتن الثاني ينص على أن تسارع الجسم يتناسب طرديًا مع محصلة القوى المؤثرة عليه وعكسيًا مع كتلته

المفردات الجديدة

النظير isotope

مطياف الكتلة mass spectrometer

تجارب طومسون

تعد الموجات الكهرومغناطيسية جزءًا لا يتجزأ من حياتنا اليومية. فهذه الموجات هي التي تحمل إليك رسائلك على الهاتف الخلوي. وهي التي تحمل الموسيقى التي تبثها أجهزة الراديو. وهي التي تمكنك من الرؤية. لكي نفهم طريقة اندماج المجالات الكهربائية والمغناطيسية لإنشاء موجات كهرومغناطيسية، علينا أن نفهم الإلكترون أولاً. هل تعرف لماذا؟ لأن الموجات الكهرومغناطيسية تنشأ بسبب تسارع الإلكترونات.

اكتشاف الإلكترون على مدار القرن التاسع عشر، كان العلماء يعتقدون أن الذرة هي أصغر وحدة في المادة. ثم تنامت الأدلة التي أكدت على أن الذرات تحتوي على جسيمات ذات شحنة سالبة. وفي عام 1894، أُطلق على هذه الجسيمات اسم الإلكترون. غير أن طبيعة الإلكترون في ذلك الوقت لم تكن معروفة، ولم يكن معروفًا كذلك ما إذا كان من الممكن فصل الإلكترونات من الذرة. وفي عام 1897، استطاع طومسون، أثناء قيامه بإجراء تجارب باستخدام أنبوب أشعة الكاثود، أن يستخرج الجسيمات ذات الشحنة السالبة من ذرات المواد المختلفة. فكيف فعل هذا؟

قام طومسون بتفريغ الهواء من أنبوب أشعة الكاثود، الشبيهة بالأنبوب الظاهر في **الشكل 1**. ووصل الأنبوب ببطارية ولدت فرق جهد كبير بين الكاثود والأنود. وفي طرف الأنبوب المواجه للكاثود، لاحظ طومسون وجود بقعة مضيئة تسببت فيها حزمة غير مرئية (شعاع الكاثود) تسارعت من الكاثود نحو الأنود بفعل فرق الجهد. وأثناء انتقالها، مر شعاع الكاثود بالشقوق الموجودة في الأنود. وأدرك طومسون أن الشعاع يتكون من جسيمات ذات شحنة سالبة، وذلك من خلال الغازات الضئيلة المتبقية في الأنبوب.

الشكل 1 في هذا الأنبوب، الشبيه بأنبوب أشعة الكاثود الذي استخدمه طومسون، يعمل فرق الجهد الموجود بين الأنود والكاثود على تسريع الإلكترونات باتجاه الأنود.

على الرغم من أن طومسون لم يكن يعرف شحنة (q) ولا كتلة (m) للجسيمات الموجودة في شعاع الكاثود، إلا إنه استطاع تحديد نسبة شحنة هذه الجسيمات إلى كتلتها. وكانت النسبة التي وجدها طومسون مرتفعة جدًا، ربما لأن كتلة الجسيمات كانت صغيرة جدًا. كما اكتشف طومسون أن نسبة الشحنة إلى الكتلة قد ظلت ثابتة بغض النظر عن نوع الغاز الموجود في الأنبوب. واستنتج طومسون أن الجسيمات كانت مكونات سالبة لجميع الذرات – إلكترونات.

نسبة الشحنة إلى الكتلة إذا أمعنا النظر في تجربة طومسون فإننا نكتشف الطريقة التي استطاع بها طومسون تحديد نسبة شحنة الإلكترون إلى كتلته. ففي داخل أنبوب أشعة الكاثود، كما في **الشكل 1**، توجد لوحتان فلزيتان ذات شحنات متضادة تنتجان مجالاً كهربيًا. بينما تنتج المغانط الكهربائية مجالاً مغناطيسيًا خارج الأنبوب. وبتغيير أحد المجالين، وجد طومسون أن بإمكانه تغيير مسار حزمة الإلكترون.

وجَّه طومسون المجال الكهربائي في اتجاه متعامد على حزمة الإلكترونات. وولد هذا المجال (E) قوة (تساوي qE) جعلت الحزمة تنحرف إلى الأعلى باتجاه اللوح الموجب. ووجَّه طومسون المجال المغناطيسي في اتجاه متعامد على حزمة الإلكترون والمجال الكهربائي. تذكر أن القوة المبذولة من قِبل المجال المغناطيسي تكون متعامدة على المجال وعلى اتجاه حركة الإلكترونات. وبالتالي فالمجال المغناطيسي في الأنبوب (B) قد ولَّد قوة (تساوي Bqv، حيث v هي سرعة الإلكترون) جعلت حزمة الإلكترون تنحرف لأسفل.

التأكد من فهم النص **التطبيق** كيف يمكنك تغيير المجال المغناطيسي بحيث تنحرف الإلكترونات لأعلى؟

عدَّل طومسون قوى المجالين الكهربائي والمغناطيسي إلى أن سارت حزمة الإلكترون في مسار مستقيم دون أن تنحرف. وعندما حدث هذا، كانت قوة كلا المجالين متساوية في المقدار ومتعاكسة في الاتجاه. ويمكن التعبير عن هذا الأمر رياضيًا على النحو التالي:

$$Bqv = Eq$$

وباشتقاق المعادلة لإيجاد قيمة v نحصل على التالي:

$$v = \frac{Eq}{Bq} = \frac{E}{B}$$

توضِّح المعادلة السابقة أن القوى كانت متوازنة فقط في حالة الإلكترونات ذات السرعة المحددة (v). إذا تم إيقاف المجال الكهربائي، فلن تتبقى سوى القوة الناشئة عن المجال المغناطيسي. أنت تعرف أن اتجاه حركة الإلكترون يكون متعامدًا على القوة المغناطيسية. وبالتالي فالإلكترون في المجال المغناطيسي المنتظم يخضع لتسارع متجه نحو المركز ويسير في مسار دائري نصف قطره r. وباستخدام قانون نيوتن الثاني للحركة الدائرية، نجد أن المعادلة التالية تصف مسار الإلكترون:

$$Bqv = \frac{mv^2}{r}$$

وباشتقاق المعادلة لإيجاد قيمة $\frac{q}{m}$ نحصل على المعادلة التالية.

نسبة شحنة إلكترون في مجال مغناطيسي إلى كتلته

في المجال المغناطيسي، تكون نسبة شحنة الإلكترون إلى كتلته مساوية لنسبة سرعة الإلكترون مقسومة على ناتج ضرب شدة المجال المغناطيسي ونصف قطر المسار الدائري للإلكترون.

$$\frac{q}{m} = \frac{v}{Br}$$

تجربة مصغرة

تحريك الجسيمات المشحونة

كيف تؤثر المجالات الكهربائية والمغناطيسية في تحريك الجسيمات المشحونة؟

مختبر الفيزياء

كتلة الإلكترون

كيف يمكنك تحديد كتلة الإلكترون؟

كتلة الإلكترون لإيجاد قيمة نسبة شحنة الإلكترون إلى كتلته، قام طومسون بحساب سرعة (v) المسار المستقيم لحزمة الإلكترون باستخدام القيم المُقاسة لكل من E و B. ثم قام بإيقاف المجال الكهربائي وقاس المسافة بين البقعة المضيئة التي أحدثتها الحزمة غير المنحرفة على طلاء الفلورسنت وبين البقعة التي تكونت عندما كان المجال المغناطيسي هو وحده المؤثر على الحزمة. وباستخدام هذه المسافة، حسب طومسون نصف قطر (r) المسار الدائري لحزمة الإلكترون وأوجد قيمة q/m ووجدها تساوي -1.759×10^{11} C/kg.

كان حساب نسبة الشحنة إلى الكتلة هي الخطوة الأولى في حساب كتلة الإلكترون. عندما كان طومسون يجري تجاربه، كان متوسط شحنة الإلكترون معروفًا من خلال تجارب التحليل الكهربائي التي أُجريت على العديد من الإلكترونات وكانت قيمتها $q = -1.602\times10^{-19}$ C. وافترض طومسون إمكانية استخدام هذه القيمة للإلكترونات المفردة. ولاحقًا، في العام 1909، أكد روبرت ميليكان هذه القيمة، حيث وجد أن جميع الإلكترونات لها نفس الشحنة (e). وبالتالي أصبح من الممكن حساب كتلة (m_e) الإلكترون باستخدام المعادلة التالية

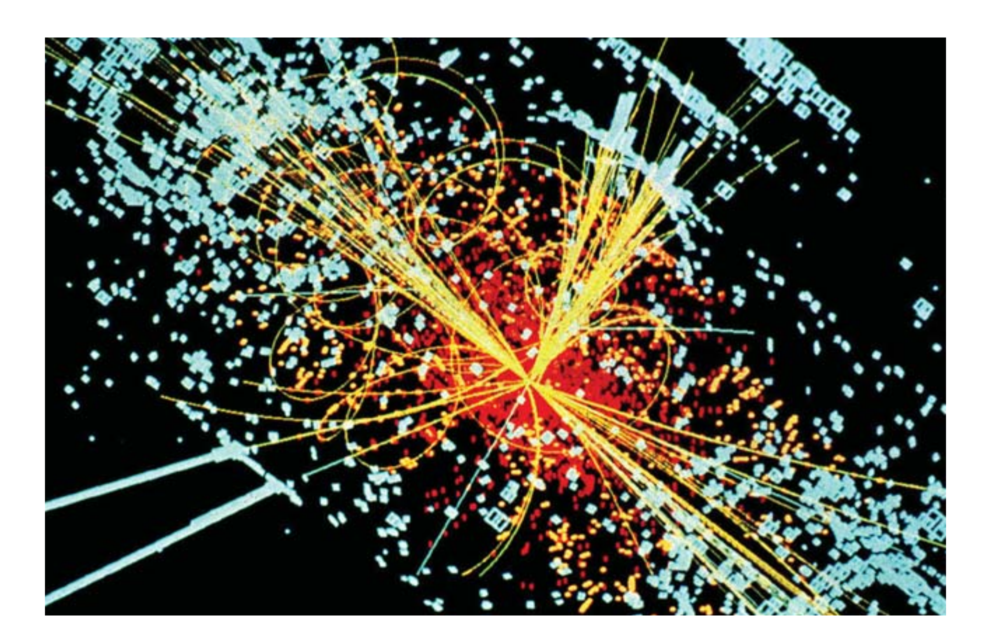
$$m_e = \frac{e}{q/m} = \frac{-1.602\times10^{-19}\ \text{C}}{-1.759\times10^{11}\ \text{C/kg}} = 9.107\times10^{-31}\ \text{kg}$$

$$m_e = 9.11\times10^{-31}\ \text{kg}.$$

التجارب باستخدام الأيونات الموجبة استخدم طومسون كذلك أنبوب أشعة الكاثود لدراسة الأيونات الموجبة. يشير الأيون إلى ذرة مشحونة أو جزيء مشحون. عند مرور الجسيمات ذات الشحنة الموجبة عبر مجال الكهربائي أو مجال مغناطيسي، فإنها تنحرف في اتجاه متعاكس لاتجاه انحراف الإلكترونات، كما يظهر في **الشكل 2**.

كتلة البروتون لجعل الأيونات موجبة، أضاف طومسون مقدارًا ضئيلاً من غاز الهيدروجين إلى الأنبوب وعكس اتجاه المجال الكهربائية بين الكاثود والأنود. أدى المجال الكهربائي القوي إلى انتزاع إلكترونات من ذرات الهيدروجين، فأصبحت الذرات أيونات موجبة. ثم عمل المجال الكهربائي على تسريع مرور الأيونات عبر الشق الضيق إلى منطقة الانحراف في الأنبوب. ومرت حزمة الأيونات الناشئة عبر المجالات الكهربائية والمغناطيسية في طريقها وصولاً إلى شاشة الفلورسنت في طرف الأنبوب.

وحدد طومسون نسبة شحنة الأيونات الموجبة للهيدروجين (والتي أُطلق عليها لاحقًا اسم البروتونات) إلى كتلتها بنفس الطريقة التي حدد بها نسبة شحنة الإلكترون إلى كتلته. ومن هذه النسبة، استطاع إيجاد كتلة البروتون الواحد ووجد أنها تساوي 1.67×10^{-27} kg. واستمر طومسون في استخدام أنبوب أشعة الكاثود لتحديد كتل الأيونات الموجبة الناتجة عن انتزاع إلكترون أو أكثر من الغازات الثقيلة كالهيليوم والنيون والأرجون.

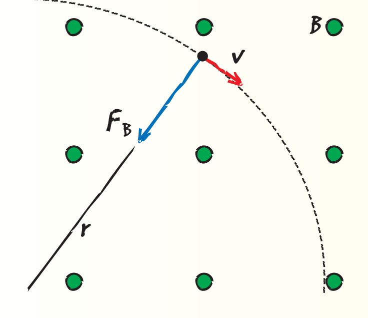


الشكل 2 تنحني مسارات الجسيمات ذات الشحنات السالبة والموجبة عند مرورها عبر مجال مغناطيسي في اتجاهات متعاكسة. وتحاكي هذه الصورة المنتجة حاسوبيًا حالة التصادم في مصادم الهدرونات الكبير LHC.

مثال 1

نصف قطر المسار يتحرك إلكترون (كتلته 9.11×10^{-31} kg) في أنبوب أشعة الكاثود بسرعة 2.0×10^{7} m/s متعامدًا على مجال مغناطيسي شدته 3.5×10^{-3} T في غياب المجال الكهربائي. كم يبلغ نصف قطر المسار الدائري للإلكترون؟

1 تحليل المسألة ورسمها



- ارسم مسار الإلكترون وضع تسمية على السرعة (v).
- ارسم المجال المغناطيسي متعامدًا على السرعة.
- ارسم القوة المؤثرة على الإلكترون. أضف القيمة r المجهولة لمسار الإلكترون.

المعلوم

$v = 2.0\times10^{7}$ m/s
$B = 3.5\times10^{-3}$ T
$m = m_e = 9.11\times10^{-31}$ kg
$q = e = 1.602\times10^{-19}$ C

المجهول

$r = ?$

2 حساب المجهول

استخدم قانون نيوتن الثاني لوصف إلكترون في أنبوب أشعة الكاثود يتعرض لمجال مغناطيسي.

$$Bqv = \frac{mv^2}{r}$$

$$r = \frac{mv}{Bq}$$

$$= \frac{(9.11\times10^{-31}\ \text{kg})(2.0\times10^{7}\ \text{m/s})}{(3.5\times10^{-3}\ \text{T})(1.602\times10^{-19}\ \text{C})}$$

◀ **عوّض عن القيم** $m = 9.11\times10^{-31}$ kg, $v = 2.0\times10^{7}$ m/s, $B = 3.5\times10^{-3}$ T, $q = 1.602\times10^{-19}$ C.

$$= 3.2\times10^{-2}\ \text{m}$$

3 تقييم الإجابة

- **هل الوحدات صحيحة؟** إن نصف قطر المسار الدائري هو قياس طولي، يُقاس بوحدة المتر.
- **هل القيم معقولة؟** تعد أنصاف الأقطار البالغ طولها سنتيمترات قليلة نموذجية لهذا النوع من الأجهزة ويمكن قياسها بسهولة. اتجاه انحراف الإلكترون (شحنة سالبة) عكس اتجاه انحراف البروتون (شحنة موجبة).

تطبيقات

بالنسبة للأسئلة التالية، سنفترض أن جميع الجزيئات المشحونة تتحرك باتجاه متعامد على مجال مغناطيسي منتظم.

.1 يتحرك بروتون بسرعة 7.5×10^{4} m/s عند مروره عبر مجال مغناطيسي شدته 0.080 T. احسب نصف قطر مساره الدائري. لاحظ أن شحنة البروتون تكون مساوية لشحنة الإلكترون غير أن إشارتها موجبة.

.2 تتحرك إلكترونات في مجال مغناطيسي شدته 3.0×10^{-3} T ومتوازنة بفعل مجال كهربائي شدته 2.4×10^{4} N/C.

.a فكم تبلغ سرعة الإلكترونات؟

.b إذا كان المجال الكهربائي ناشئًا عن لوحين مشحونين موضوعين على مسافة 0.50 cm من بعضهما البعض، فكم يبلغ فرق الجهد الكهربائي بين اللوحين؟

.c إذا تم إيقاف المجال الكهربائي. فكم سيبلغ نصف قطر المسار الدائري الذي ستسير فيه الإلكترونات؟

.3 بروتونات تسير بدون انحراف في مجال مغناطيسي شدته 0.060 T ومتوازنة بفعل مجال كهربائي شدته 9.0×10^{3} V/m. فما هي سرعة البروتونات المتحركة؟

.4 **التحدي** ما المسار الذي سيأخذه أيون موجب يتحرك في مجال مغناطيسي يزيد خطيًا مع الزمن؟

مطياف الكتلة

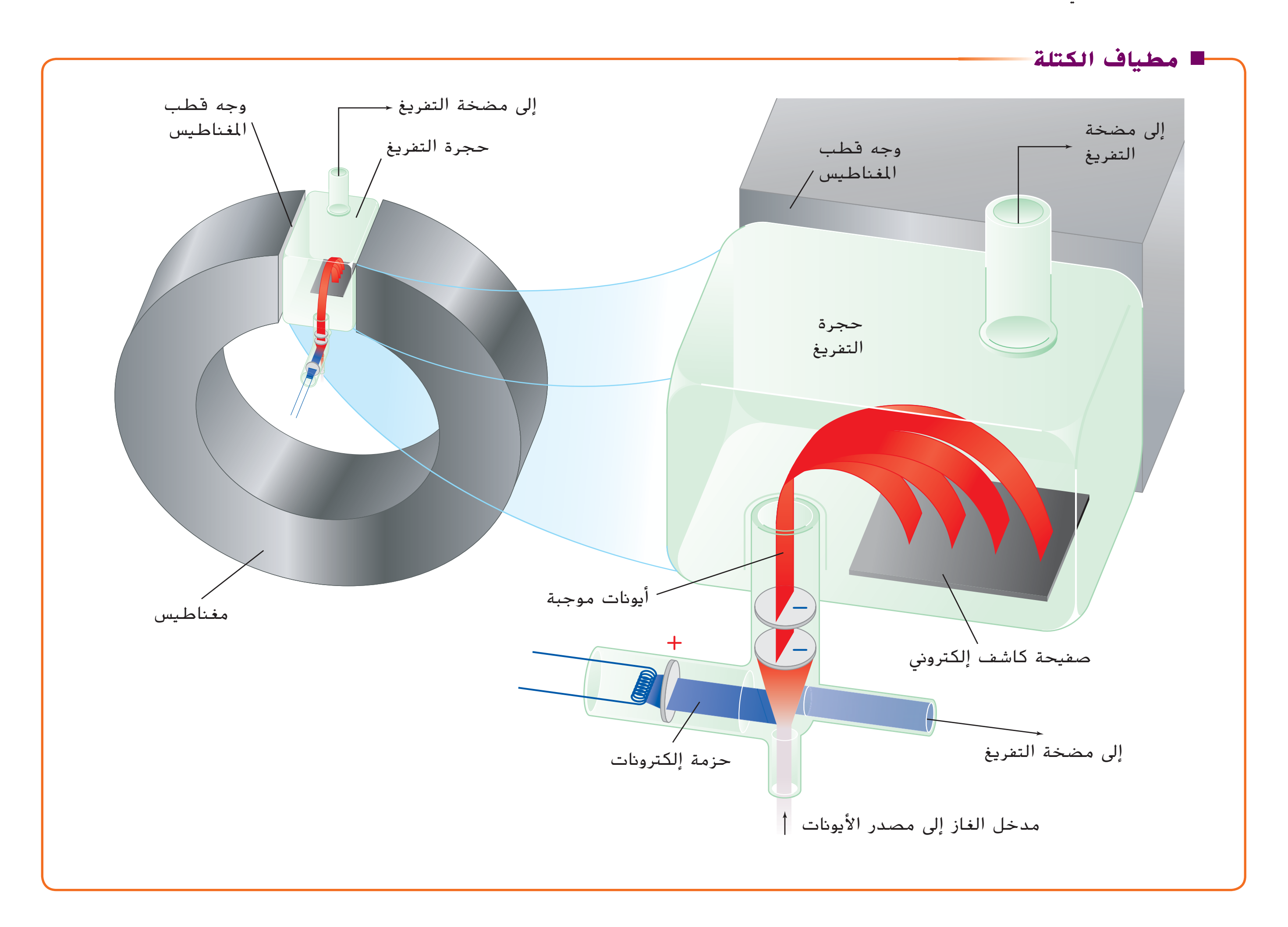
حدث شيء لافت للانتباه عندما وضع طومسون غاز النيون في أنبوب أشعة الكاثود. حيث لاحظ طومسون وجود نقطتين مضيئتين على الشاشة بدلاً من نقطة واحدة. وبحساب قيمة q/m لكل نقطة على حدة، استنتج طومسون أن هناك ذرتين مختلفتين من النيون لهما نفس الخواص الكيميائية ولكن تختلفان في الكتلة. وتُعرف أشكال الذرة الواحدة المتشابهة في الخواص الكيميائية والمختلفة في الكتلة باسم **النظائر.**

وكان فصل طومسون لنظائر النيون على أساس كتلتها هو التطبيق الأول لقياس الطيف الكتلي. **مطياف الكتلة** هو عبارة عن أداة تقيس نسبة شحنة الأيونات الموجبة في المادة إلى كتلتها. ومن هذه النسبة، يصبح من الممكن تحديد النظائر الذرية التي تتشكل منها المادة. ويظهر أحد أنواع مطياف الكتلة في **الشكل 3.**

يجب أن تكون المواد التي يتم إدخالها في مطياف الكتلة إما غازات في الأصل أو مواد تم تسخينها لتصل إلى الحالة الغازية. ويتم إدخال الغاز إلى مكوّن يُعرف باسم المصدر الأيوني، ويمكنك رؤيته في أسفل **الشكل 3.** وفي المصدر الأيوني، تتصادم حزمة نشطة من الإلكترونات مع ذرات الغاز وتنتزع منها إلكترون أو أكثر لنحصل على أيونات موجبة. ثم يعمل المجال الكهربائي–الناتج عن فرق الجهد بين القطبين في المصدر الأيوني–على تسريع الأيونات التي تدخل مجالاً مغناطيسيًا في حجرة التفريغ. يعمل المجال المغناطيسي المنتظم على تحريك الأيونات في مسار دائري قبل أن تصطدم بكاشف الإلكترونات.

الشكل 3 داخل مطياف الكتلة (الموجود على اليسار). يعمل المغناطيس على انحراف الأيونات الموجبة في حجرة التفريغ وفق كتلتها. وكل جسيم تكون له كتلة منفصلة يتم تسجيلها على اللوح الكاشف في غرفة التفريغ.

حدد القطب الشمالي للمغناطيس.



حساب نسبة الشحنة إلى الكتلة بمجرد أن تتحرك الأيونات في مطياف الكتلة في مجال مغناطيسي، فإنها تأخذ مسارًا دائريًا. ويعتمد نصف قطر هذا المسار على كتلة الأيون. فكلما كان الأيون أخف، زاد انحناؤه وقل نصف قطر مساره الدائري. ويمكن استخدام نصف قطر مسار كل أيون لتحديد نسبة الشحنة إلى الكتلة. يمكن حساب نصف قطر (r) مسار الأيون باستخدام قانون نيوتن الثاني للحركة:

$$Bqv = \frac{mv^2}{r}$$

وباشتقاق المعادلة لإيجاد قيمة r نحصل على المعادلة التالية:

$$r = \frac{mv}{qB}$$

ويمكن حساب سرعة الأيون المتسارع من معادلة الطاقة الحركية للأيونات المتحركة بعد سكون إذا عرفنا فرق الجهد (V_{accel}):

$$KE = \frac{1}{2}mv^2 = qV_{accel}$$

$$v = \sqrt{\frac{2qV_{accel}}{m}}$$

وبالتعويض عن هذا التعبير بقيمة v في المعادلة $r = \frac{mv}{qB}$ فإننا نحصل على نصف قطر المسار الدائري للأيون:

$$r = \frac{mv}{qB}$$

$$= \frac{m}{qB}\sqrt{\frac{2qV_{accel}}{m}}$$

$$= \frac{1}{B}\sqrt{\frac{2V_{accel}m}{q}}$$

يمكن تبسيط هذه المعادلة بضرب طرفيها في B لنحصل على المعادلة التالية:

$$Br = \sqrt{\frac{2mV_{accel}}{q}}$$

ويمكن إعادة ترتيب هذه المعادلة بالشكل الظاهر أدناه.

نسبة شحنة أيون في مطياف الكتلة إلى كتلته

تساوي نسبة شحنة الإلكترون إلى كتلته ضعف فرق الجهد المتسارع مقسومًا على ناتج ضرب مربع شدة المجال المغناطيسي ومربع نصف قطر المسار الدائري للأيون.

$$\frac{q}{m} = \frac{2V_{accel}}{B^2r^2}$$

لحساب كتلة الأيون، يمكن قسمة شحنة الأيون على نسبة الشحنة إلى الكتلة المقاسة. شحنة البروتون تساوي شحنة الإلكترون غير أنها موجبة: 1.602×10^{-19} C. لاحظ أنه في حالة انتزاع أكثر من إلكترون من ذرات الغاز في المصدر الأيوني، يجب ضرب الشحنة في عدد الإلكترونات المنزوعة. ويمكن التحكم في هذا العدد (عدد الإلكترونات المنزوعة.) من قِبل مشغل مطياف الكتلة.

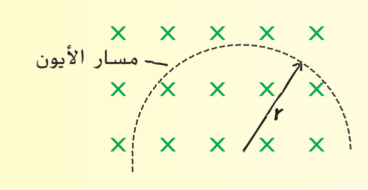
☑ **التأكد من فهم النص** **الحساب** ما هي شحنة الأيون الذي نُزعت منه ثلاثة إلكترونات؟

مثال 2

كتلة ذرة النيون أنتج مشغل مطياف الكتلة حزمة من أيونات النيون التي انتُزع منها إلكترونان. أي أن هذه الأيونات متأينة بشكل ثنائي. وتم تسريع الأيونات في البداية بفرق جهد مقداره 34 V. عند مرورها عبر مجال مغناطيسي شدته 0.050 T، وكان نصف قطر مسارها يساوي 53 mm. احسب كتلة عدد النويات (البرتونونات و النيوترونات) في نواة النيون .

1 تحليل المسألة ورسمها

- ارسم المسار الدائري الذي تتبعه الأيونات. ضع تسمية على نصف القطر.
- ارسم وضع تسمية على فرق الجهد بين القطبين.



المعلوم		المجهول
$m_{\text{النوية}} = 1.67\times10^{-27}$ kg	$V_{accel} = 34$ V	$m_{\text{نيون}} = ?$
$q = 2(1.602\times10^{-19}$ C$)$	$B = 0.050$ T	$N_{\text{نوية}} = ?$
$= 3.20\times10^{-19}$ C	$r = 0.053$ m	

2 حساب المجهول

استخدم معادلة نسبة شحنة الأيون في مطياف الكتلة إلى كتلته.

$$\frac{q}{m_{\text{نيون}}} = \frac{2V_{accel}}{B^2r^2}$$

$$m_{\text{نيون}} = \frac{qB^2r^2}{2V_{accel}}$$

$$= \frac{(3.204\times10^{-19}\text{ C})(0.050\text{ T})^2(0.053\text{ m})^2}{2(34\text{ V})}$$

◄ عوِّض عن القيم $q = 3.204\times10^{-19}$ C, $B = 0.050$ T, $r = 0.053$ m, and $V_{accel} = 34$ V

$$= 3.3\times10^{-26}\text{ kg}$$

اقسم كتلة أيون النيون على كتلة البروتون لإيجاد عدد النويات.

$$N_{\text{نوية}} = \frac{m_{\text{نيون}}}{m_{\text{نوية}}}$$

$$= \frac{3.3\times10^{-26}\text{ kg}}{1.67\times10^{-27}\text{ kg}}$$

$$\cong 20 \text{ نوية}$$

3 تقييم الإجابة

- **هل الوحدات صحيحة؟** يجب أن تُقاس الكتلة بالجرامات أو الكيلوجرامات. عدد النويات لا يُمثَّل بأي وحدة.
- هل هذا المقدار واقعي؟ لذرة النيون نظيران كتلتاهما التقريبية 20 و 22.

تطبيقات

5. أُرسلت حزمة متأينة بشكل مفرد (1+) من ذرات الأكسجين عبر مطياف الكتلة. القيم هي $B = 7.2\times10^{-2}$ T, $q = 1.602\times10^{-19}$ C, $r = 0.085$ m و $V_{accel} = 110$ V. احسب كتلة ذرة الأكسجين.

6. حلل مطياف الكتلة حزمة ثنائية التأين (2+) من ذرات الأرجون وأظهر بياناتها. وكانت القيم الناتجة عن التحليل هي $B = 5.0\times10^{-2}$ T, $r = 0.106$ m و $2(1.602\times10^{-19}$ C$)$, $V_{accel} = 66.0$ V. احسب كتلة ذرة الأرجون.

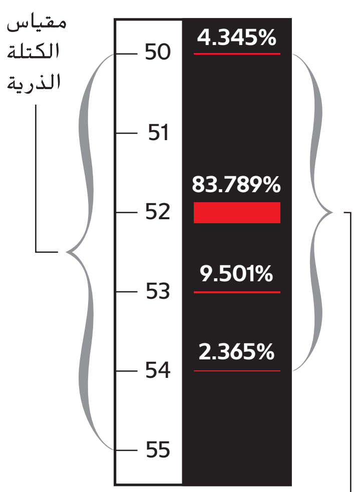
7. تتسارع حزمة أحادية التأين (1+) من ذرات الليثيوم ($m \approx 7m_{\text{بروتون}}$) بفرق جهد مقداره 320 V وتمر عبر مجال مغناطيسي شدته 1.5×10^{-2} T. فما نصف قطر مسار انحناء الحزمة في المجال المغناطيسي؟

8. **التحدي** بغض النظر عن طاقة الإلكترونات المستخدمة لإنتاج الأيونات، لم يستطع طومسون نزع أكثر من إلكترون واحد من ذرة الهيدروجين. فما الذي كان يمكن أن يستنتجه بشأن الشحنة الموجبة لذرة الهيدروجين؟

تحليل النظائر تصطدم الأيونات في مطياف الكتلة في **الشكل 3** بالكاشف في أماكن مختلفة. وتعتمد أماكن اصطدام الأيونات بالكاشف على كتلتها. فكلما زادت كتلة الأيون، زاد قطر مساره المنحني. ويمكن قياس هذا القطر بسهولة لأنه عبارة عن المسافة بين موضع اصطدام الأيون والشق الموجود في الإلكترود. ونصف قطر (r) المسار يساوي نصف هذه المسافة المُقاسة.

المسافة التقريبية بين مواضع اصطدام أيونات عينة الكروم المتأينة بالكاشف كما هو موضَّح في **الشكل 4**. وتشير العلامات الأربعة البارزة إلى أن عينة الكروم في الأصل تتكون من أربعة نظائر. وتقاس وفرة كل نظير باتساع العلامة التي يخلفها على الكاشف.

جميع أيونات الكروم في **الشكل 4** ذات شحنة مفردة حيث تم انتزاع إلكترون واحد فقط من حزمة الكروم الأصلية في المصدر الأيوني. تعتمد الشحنة على عدد الإلكترونات المنزوعة من الذرات الأصلية (المحايدة). بانتزاع الإلكترون الأول والحصول على ذرة متأينة بشكل مفرد (+1)، يلزم طاقة أكبر لانتزاع الإلكترون الثاني للحصول على ذرة متأينة بشكل مزدوج (+2). وهذه الطاقة الإضافية يمكن الحصول عليها بزيادة المجال الكهربائي وهو ما يمنح حزمة الإلكترونات مزيدًا من الطاقة الحركية. يمكن لحزمة من الإلكترونات ذات الطاقة الأعلى أن تنتج أيونات ذات شحنة أحادية وأيونات ذات شحنة ثنائية. وبهذه الطريقة، يمكن لمشغل مطياف الكتلة أن يختار شحنة الأيون الذي يريد دراسته.



الشكل 4 يشير عرض العلامات الأربعة التي خلفتها نظائر الكروم على كاشف الإلكترونات إلى وفرة النظائر. لاحظ أن نظير الكروم الذي تبلغ كتلته 52 بروتون هو الأكثر وفرة. وأن مجموع النسب المئوية للنظائر الأربعة تساوي 100%. ويشير المتوسط المرجح لكتل نظائر العنصر إلى كتلة العنصر في الجدول الدوري.

احسب متوسط كتلة نظائر الكروم.

☑ **التأكد من فهم النص** **صف كيفية الحصول على أيون مشحون بشحنة ثنائية.**

تطبيقات قياس الطيف الكتلي يتمتع مطياف الكتلة بحساسية بالغة تجعل بإمكانه فصل الأيونات ذات الكتل المختلفة اختلافًا ضئيلاً يصل إلى واحد من عشرة آلاف في المائة. وبسبب هذه الدقة، يمكن للعلماء استخدام مطياف الكتلة للكشف عن وجود جزيء واحد في عينة بها 10 مليارات جزيء.

لمطياف الكتلة مجموعة واسعة من التطبيقات. فكما قرأت في بداية هذه الوحدة، يُستخدم مطياف الكتلة لتحليل الغلاف الجوي والتربة في المريخ وأجسام أخرى في النظام الشمسي. كما يشيع استخدام مطياف الكتلة في العلوم الجيولوجية والمستحضرات الدوائية والبيولوجية، وحتى علوم الطب الشرعي. وعلى سبيل المثال، يُستخدم مطياف الكتلة في المطارات للكشف عن آثار الجزيئات الموجودة في المتفجرات والتي يمكن أن يحملها المسافرون في أمتعتهم أو أيديهم أو أحذيتهم.

القسم 1 مراجعة

.9 **الفكرة الرئيسة** يمكن معرفة نصف قطر المسار الدائري للأيون في مطياف الكتلة عن طريق المعادلة $r = \frac{1}{B}\sqrt{\frac{2V_{accel}m}{q}}$ استخدم هذه المعادلة لتفسير كيف يستطيع مطياف الكتلة فصل الأيونات ذات الكتل المختلفة.

.10 **أنبوب أشعة الكاثود** صف كيف يمكن لأنبوب أشعة الكاثود الذي استخدمه طومسون إنشاء حزمة من الالكترونات.

.11 **المجال المغناطيسي** يمكن لمطياف الكتلة تحليل الجزيئات التي تساوي كتلتها كتلة مئات البروتونات. إذا تم إنتاج أيونات ذات شحنة مفردة من هذه الجزيئات باستخدام نفس فرق الجهد المتسارع المستخدم مع الأيونات الأصغر، فكيف يجب تغيير المجال المغناطيسي لمطياف الكتلة بحيث تصطدم الأيونات بالكاشف؟

.12 **نصف قطر المسار** يتحرك بروتون بسرعة 8.4×10^4 m/s أثناء مروره عبر مجال مغناطيسي شدته 12.0 mT. فكم يبلغ نصف قطر مساره الدائري؟

.13 **الكتلة** تتسارع حزمة متأينة بشكل مزدوج (+2) من ذرات الأكسجين بفرق جهد مقداره 232 V ثم يدخل الأكسجين مجالاً مغناطيسيًا شدته 75 mT ويسير في مسار منحني نصف قطره 8.3 cm. فكم تبلغ كتلة ذرة الأكسجين؟

.14 **التفكير الناقد** في المسألة المحلولة 2 (في الصفحة السابقة). تم تحديد كتلة أحد نظائر النيون. وهناك نظير آخر من نظائر النيون تساوي كتلته كتلة 22 بروتون. فكم سيكون بعد المسافة بين هذين النظرين على الكاشف؟

القسم 2 المجالات الكهربائية والمغناطيسية في الفضاء



الفكرة الرئيسة

ترتبط الموجات الكهرومغناطيسية وتعمل على تذبذب المجالات الكهربائية والمغناطيسية التي تنتقل عبر الفضاء وتتفاعل مع المادة.

الأسئلة الرئيسة

- كيف تنتشر الموجات الكهرومغناطيسية في الفضاء؟
- كيف تتباين سرعة انتشار الموجات الكهرومغناطيسية في المواد المختلفة؟
- كيف تقوم الموجات الكهرومغناطيسية بإرسال المعلومات؟
- ما العوامل التي تؤثر في حساسية الهوائي للموجات الكهرومغناطيسية ذات الأطوال الموجية المعينة؟

مراجعة المفردات

المكثف جهاز كهربائي يستخدم لتخزين الطاقة الكهربائية ويتكون من لوحين من مادة موصلة يفصل بينهما عازل.

المفردات الجديدة

الموجة الكهرومغناطيسية
electromagnetic wave

الطيف الكهْرَومغناطيسي
electromagnetic spectrum

الإشعاع الكهْرَومغناطيسي
electromagnetic radiation

جهاز الإرسال transmitter

الهوائي antenna

العازل الكهربائي dielectric

الموجة الحاملة carrier wave

الكهْرَوضغطية piezoelectricity

جهاز الاستقبال receiver

الفيزياء في حياتك

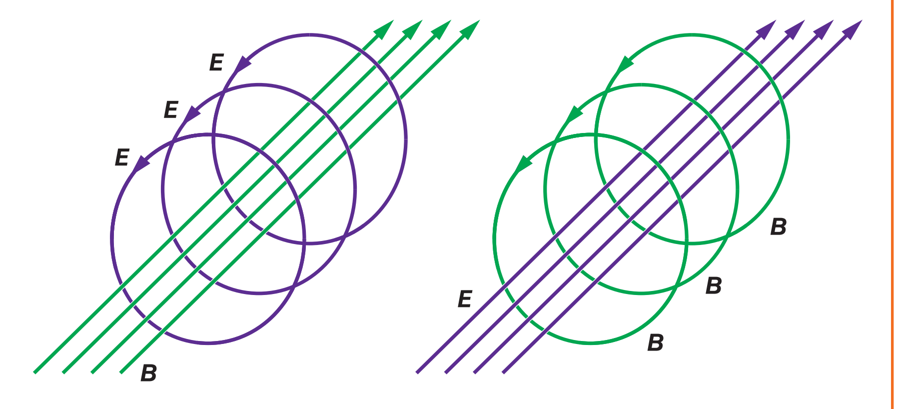
هل كنت تعلم أن الموجات الكهرومغناطيسيه تُستخدم لطهي الطعام وإرسال الرسائل النصية من هاتفك المحمول؟ الموجات الكهرومغناطيسيه تحمل الطاقة. ويمكنها أيضًا حمل معلومات. كيف يمكن للموجات الكهرومغناطيسية حمل المعلومات؟

ما المقصود بالموجات الكهرومغناطيسية؟

قرأت في القسم 1 أن الإلكترونات المتسارعة تنشئ موجات كهرمغناطيسية وأن هذه الموجات هي مزيج من المجالات الكهربائية والمجالات المغناطيسية. تذكر أن هانز كريستيان أورستد كان أول من أثبت وجود علاقة بين الكهرباء والمغناطيسية عندما وجد، في عام 1820، أن الشحنات المتحركة تنشئ مجالات مغناطيسية. وبعدها بعشرة أعوام، اكتشف مايكل فاراداي وجوزيف هنري، كلٌ على حدة، أن العكس صحيح–أي أن المجال المغناطيسي لسلكٍ ما يمكن أن يستحث مجالاً كهربائيًا.

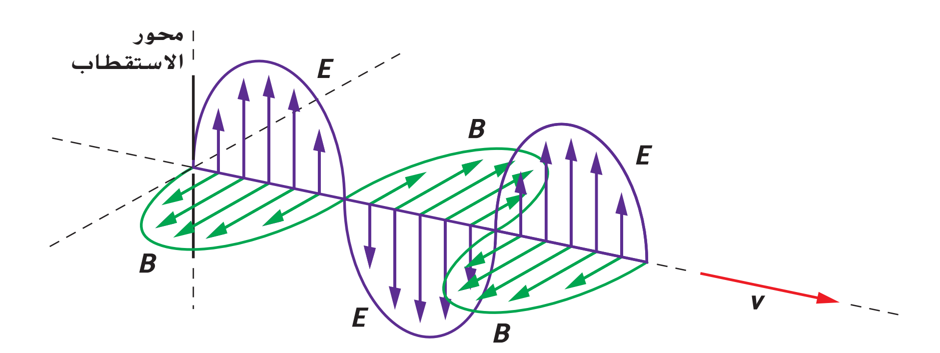
الحركة في الفضاء يمكن للمجالات الكهربائية أن تُستحث حتى بدون سلك. فكما يظهر على يمين **الشكل 5**، يمكن للمجال المغناطيسي المتغير أن ينشئ بمفرده مجالاً كهربائيًا. والعكس صحيح. فيمكن للمجال الكهربائي المتغير أن ينشئ مجالاً مغناطيسيًا كما يظهر على يسار **الشكل 5**. وقد صاغ عالم الفيزياء الاسكتلندي جيمس ماكسويل العلاقة بين المجال الكهربائي والمجال المغناطيسي في عام 1873. عندما لخَّص عمل كولوم وأورستد وفاراداي في أربع معادلات. وقد تنبأت هذه المعادلات بإمكانية انتقال الموجات الكهرومغناطيسية في الفضاء. وفي عام 1887، أكد تلك النبوءة عالم الفيزياء الألماني هاينريش هرتز. وأُطلق اسم هرتز بعدها على الوحدة التي تقيس تردد تذبذب الموجة. تذكر أن 1 Hz يساوي دورة واحدة في الثانية.

وفي الوقت الحالي، أصبح من المعروف أن **الموجات الكهرومغناطيسية** ترتبط وتعمل على تذبذب المجالات الكهربائية والمغناطيسية التي تنتقل عبر الفضاء والمادة. وقد أدت معرفة خصائص الموجات الكهرومغناطيسية إلى العديد من التقنيات التي كان لها أثر هائل على المجتمع.



الشكل 5 يمكن لمجال كهربائي أن ينشأ عن مجال مغناطيسي متغير (اليسار). لاحظ أن خطوط المجال الكهربائي عبارة عن حلقات مغلقة. وخلافاً لمجال الكهرباء الساكنة، لا توجد شحنات كهربائية تبدأ عندها الخطوط أو تنتهي.

يمكن لمجال مغناطيسي أن ينشأ عن مجال كهربائي متغير (اليمين).



الشكل 6 تتذبذب المجالات الكهربائية والمغناطيسية التي تتألف منها الموجة الكهرومغناطيسية في اتجاهات متعامدة على بعضها البعض وفي اتجاه متعامد على اتجاه سرعة الموجة (v).

خصائص الموجات الكهرومغناطيسية ما العلاقة بين المجالات المغناطيسية والمجالات الكهربائية في الموجة الكهرومغناطيسية؟ تنشئ الإلكترونات المتسارعة المجال الكهربائي للموجة، ويعمل المجال الكهربائي المتباين على إنشاء مجالها المغناطيسي. وتظهر اتجاهات كلا المجالين في **الشكل 6**. ومع حركة الموجة، يتذبذب مجالها الكهربائي صعودًا وهبوطًا، بينما يتذبذب مجالها المغناطيسي في اتجاه متعامد على اتجاه المجال الكهربائي. ويكون كلا المجالين الكهربائي والمغناطيسي متعامدًا على اتجاه انتشار الموجة.

السفر في الفراغ جميع الموجات الكهرومغناطيسية تتحرك بنفس الطريقة. كموجات الحبل، تعتبر الموجات الكهرومغناطيسية موجات مستعرضة ويمكن أن تنتقل عبر الوسط. وعلى خلاف الأنواع الأخرى من الموجات، يمكن للموجة الكهرومغناطيسية أن تنتقل في الفراغ. وتساوي السرعة التي تنتقل بها الموجات الكهرومغناطيسية في الفراغ 299,792,458 m/s أو تقريبًا 3.00×10^{8} m/s ويشار إليها بالرمز c، سرعة الضوء. وتنتقل الموجات الكهرومغناطيسية بسرعة أبطأ قليلًا في الهواء. تذكر أن هناك علاقة بين الطول الموجي والتردد وسرعة الموجة كما يظهر من المعادلة التالية:

$$\lambda = \frac{v}{f}$$

في المعادلة المذكورة أعلاه، يُقاس الطول الموجي (λ) بالأمتار، وتُقاس السرعة (v) بوحدة المتر لكل ثانية، ويقاس التردد (f) بوحدة الهرتز. بالنسبة للموجة الكهرومغناطيسية التي تنتقل عبر الفضاء، فإن سرعتها (v) تساوي سرعة الضوء (c). وبالتالي تصبح المعادلة بالنسبة للموجة الكهرومغناطيسية كما يلي:

$$\lambda = \frac{c}{f}$$

لاحظ أنه في معادلة الطول الموجي والتردد، يكون حاصل ضرب التردد في الطول الموجي ثابتًا – ويساوي c – لأي موجة كهُرَمغناطيسية. وبالتالي إذا زاد الطول الموجي يقل التردد، والعكس صحيح.

☑ **التأكد من فهم النص** **احسب إذا زاد تردد الموجة بعامل 1.25، فبأي عامل سيتغير الطول الموجي؟**

تطبيقات

15. ما الطول الموجي للضوء الأخضر إذا علمت أن تردده يساوي 5.70×10^{14} Hz؟

16. إذا كان تردد موجة كهرومغناطيسية 8.2×10^{14} Hz. فما هو الطول الموجي لهذه الموجة؟

17. ما هو تردد الموجة الكهرومغناطيسية التي يبلغ طولها الموجي 2.2×10^{-2} m؟

18. **التحدي** إذا كانت موجة كهرومغناطيسية تنتشر باتجاه نحو اليمين وكان المجال الكهربائي يتجه إلى داخل وخارج الصفحة، ففي أي اتجاه سيكون المجال المغناطيسي؟

أنواع الموجات الكهرومغناطيسية يظهر نطاق الترددات التي تكوّن السلسلة المتصلة من الموجات الكهرومغناطيسية، **الطيف الكهرومغناطيسي**، في **الشكل 7.** لاحظ أن الضوء—وهو الجزء الوحيد من الطيف الذي تستطيع عيناك رؤيته —لا يشكل سوى نسبة ضئيلة من الطيف الكهرومغناطيسي.

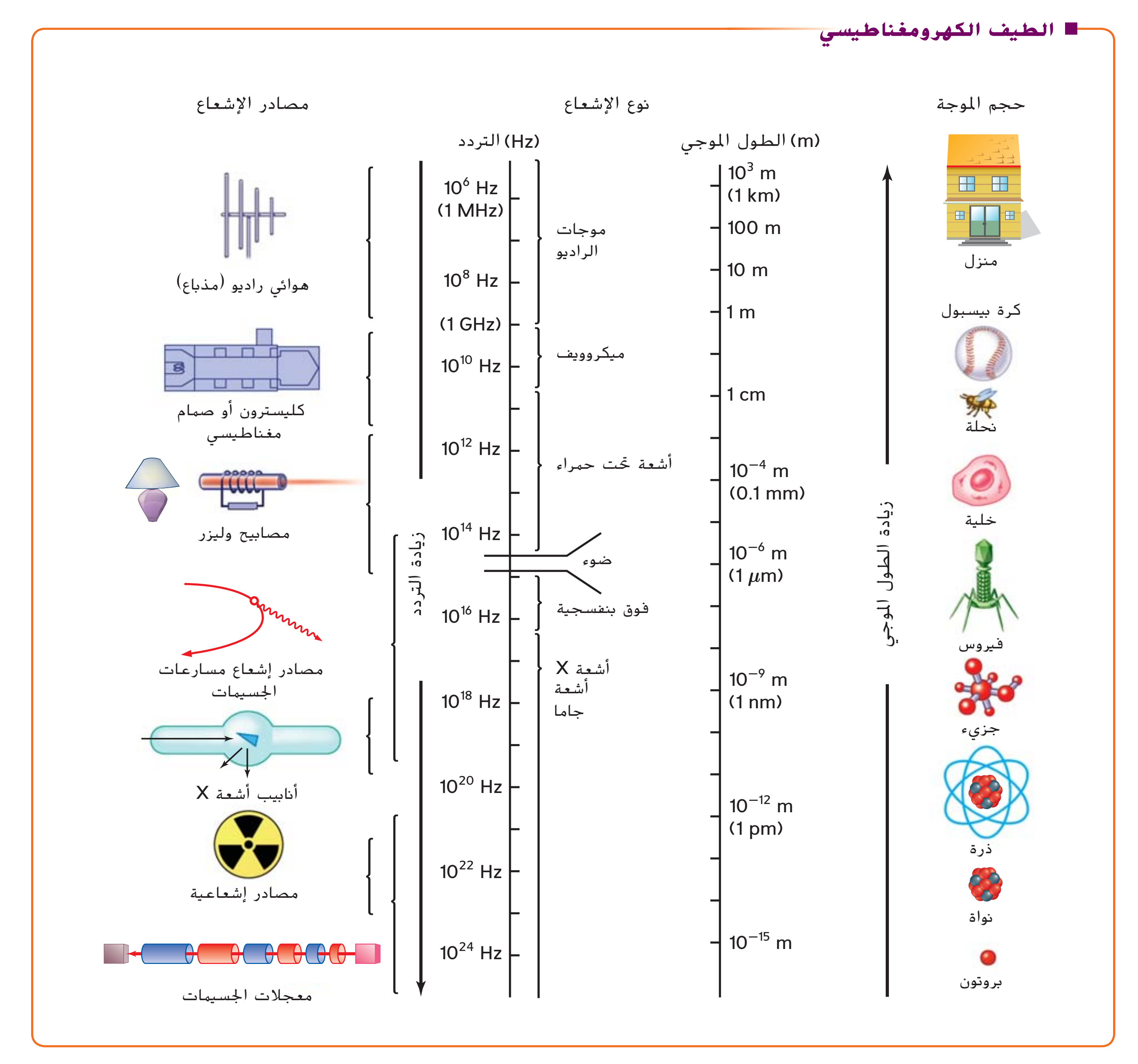
تحمل الموجات الكهرومغناطيسية الطاقة في مجالاتها الكهربائية والمغناطيسية المتذبذبة. وتُعرف الطاقة التي تحملها أو تنشرها الموجة الكهرومغناطيسية باسم **الإشعاع الكهرومغناطيسي.** وتتناسب الطاقة التي تحملها الموجة الكهرومغناطيسية مع مربع سعة المجال الكهربائي والمساحة التي تعبرها الموجة.

بعض الإشعاعات الكهرومغناطيسية تكون نشطة بما يكفي لتضر بالإنسان. ومع ذلك فيمكن التحكم في طاقة الموجات الكهرومغناطيسية، بما في ذلك الموجات عالية الطاقة، لاستخدامها في أغراض الاتصالات والأغراض الصناعية والطبية.

الشكل 7 يحتوي الطيف الكهرومغناطيسي على موجات تتراوح ما بين موجات الراديو الطويلة (ذات الأطوال الموجية الأكبر من المنازل) وموجات جاما القصيرة (ذات الأطوال الموجية الأصغر من الذرات). يوضّح العمود الأيسر أمثلة لمصادر الإشعاع. لاحظ أن تردد الموجة يتجاوز الترددات المبينة في هذه الصورة.

ملاحظة أي أنواع الموجات الكهرومغناطيسية في حجم البروتون؟

■ **الطيف الكهرومغناطيسي**



تحدي الفيزياء

الطول الموجي للضوء فيما يلي الأطوال الموجية لبعض ألوان الضوء في **الجدول 1**.

1. ما اللون الذي له أكبر طول موجي؟

2. ما اللون الذي ينتشر بشكل أسرع في الفراغ؟

3. تحيد الموجات ذات الأطوال الموجية الأطول حول الأجسام الموضوعة في مسارها أكثر من الموجات ذات الأطوال الموجية الأقصر. ما اللون الأكثر حيودًا؟ وما اللون الأقل حيودًا؟

4. احسب نطاق تردد كل لون من ألوان الضوء الموجودة في **الجدول 1**.

الجدول 1
أطوال موجات الضوء

اللون	طول الموجة (nm)
البنفسجي النيلي	390 to 455
أزرق	455 to 492
أخضر	492 to 577
أصفر	577 to 597
برتقالي	597 to 622
أحمر	622 to 700

استخدامات الموجات منخفضة التردد تستخدم أدنى الموجات ترددًا — موجات الراديو — بشكل رئيسي في بث المعلومات. يمكن إرسال موجات الراديو الطولية لمسافات طويلة لأنها تنعكس على الأيونات في الغلاف الجوي. أما موجات الراديو الأقصر والمستخدمة في التلفاز والراديو فتنتقل في خطوط مستقيمة وبالتالي يجب نقلها على مراحل من محطة إلى أخرى على طول سطح الأرض المنحني. ترسل الهواتف الخلوية ونظام تحديد المواقع المعلومات باستخدام موجات الراديو القصيرة جدًا والتي تُعرف باسم موجات المايكروويف. كما تُستخدم موجات المايكروويف في طهي الطعام. حيث يمتص الماء والدهون الموجودة في الطعام موجات المايكروويف وتتحول طاقة الموجات إلى طاقة حرارية تُستخدم لطهي الطعام.

الطول الموجي للأشعة تحت الحمراء أقصر من الطول الموجي لموجات المايكروويف. وبالتالي يمكن للكاميرات المزودة بأجهزة استشعار خاصة للكشف عن الأشعة تحت الحمراء أن تنتج صورًا. كما تتيح الكاميرات ومناظير الرؤية الليلية التي تعمل بالأشعة تحت الحمراء الرؤية في الظلام. ونظرًا لأن الأجسام الساخنة تبعث الأشعة تحت الحمراء (ذات الأطوال الموجية الطويلة)، يمكن لكاشفات الأشعة تحت الحمراء أن تقيس درجة حرارة المنازل والأجسام الأخرى. كما يمكن استخدام الأشعة تحت الحمراء في تدفئة المباني. ويمكن للأشعة تحت الحمراء القريبة (ذات الأطوال الموجية الأقصر والترددات الأعلى) أن تحمل إشارات على أنظمة الألياف البصرية أو عن طريق الهواء، مبرمجة من أجهزة التحكم عن بعد.

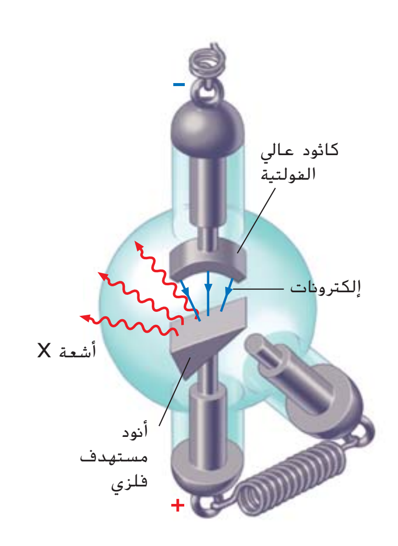
تتمتع الأشعة فوق البنفسجية بترددات أعلى. ويمكن للأشعة فوق البنفسجية تأيين الجزيئات والذرات وإحداث تفاعلات كيميائية، مثل حروق الشمس. كما تُستخدم الأشعة فوق البنفسجية في الصناعة لمعالجة البوليمرات وتعقيم الأدوات. وفي صناعة أشباه الموصلات، كما تستخدم الأشعة فوق البنفسجية لحفر النقوش على رقائق السليكون في الدوائر المتكاملة.

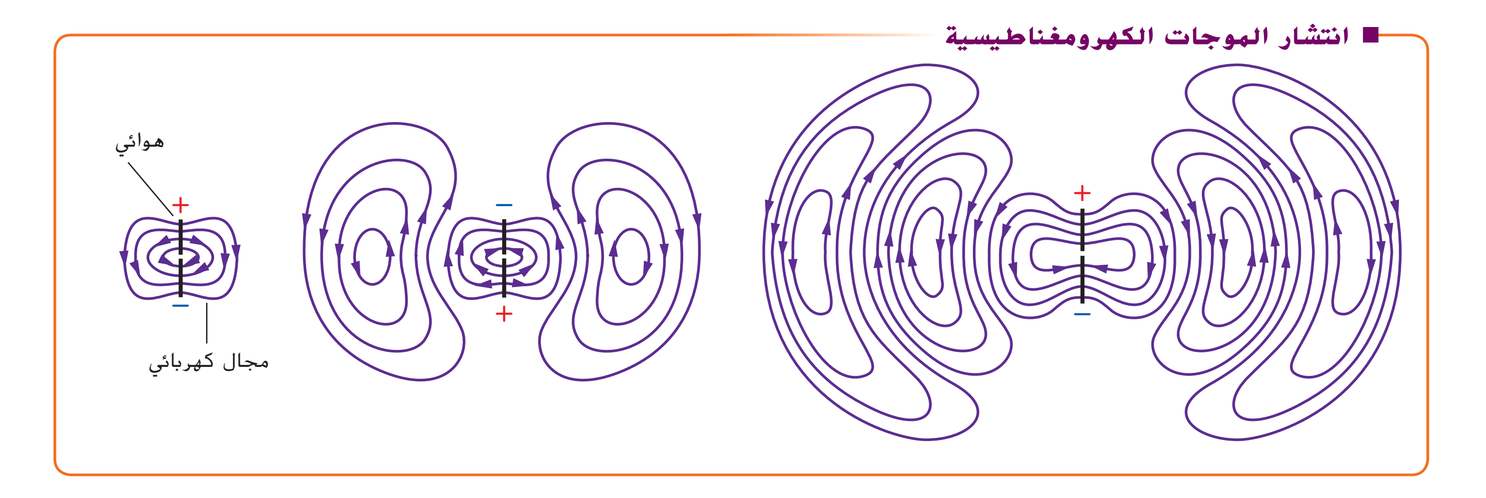
☑ **التأكد من فهم النص** **المقارنة** بين انتشار موجات الراديو القصيرة والطويلة.

استخدامات الموجات عالية التردد تنتج أشعة إكس عند استخدام إلكترونات عالية الطاقة لتنتزع من الذرات إلكترونات كانت شديدة الارتباط بها. وعندما تعيد الإلكترونات في الذرات ترتيب نفسها، تنبعث أشعة إكس. وقد اكتشف الفيزيائي الألماني ولهلم رونتجن أشعة إكس في عام 1895 باستخدام أنبوب زجاجي فارغ يشبه المبين في **الشكل 8**. في أنابيب أشعة إكس الحديثة، يتم تسريع الإلكترونات إلى سرعات عالية من خلال فروق جهد تساوي 20,000 V أو أكثر. أنت على الأرجح معتاد على صور العظام والأسنان بأشعة إكس. كما تُستخدم أشعة إكس على نطاق واسع للقضاء على الخلايا السرطانية.

أشعة جاما هي أحد أنواع الإشعاع الكهرومغناطيسي وتتميز بأنها ذات ترددات عالية. وهذه الموجات تأتي من النوى المشعة للذرات. ويمكن استخدام أشعة جاما للكشف عن المواد الخطرة في حاويات الشحن. وفي الطب، تُستخدم أشعة جاما لعلاج السرطان بتدمير الخلايا السرطانية.

الشكل 8 في الأنبوب الزجاجي الذي استخدمه رونتجن، أعطى فرق الجهد المرتفع جدًا طاقة حركية كبيرة للإلكترونات، وهذه الطاقة كانت كافية لإنتاج أشعة إكس عند اصطدام الإلكترونات بالأنود المعدني. واستمر الوهج الذي أحدثته الإلكترونات على الشاشة الفسفورية حتى عندما قام رونتجن بوضع قطعة من الخشب بين الأنبوب والشاشة. ولكن عندما وضع رونتجن يده بين الأنبوب وفيلم التصوير الضوئي، حجبت عظام يده تلك الأشعة.





الشكل 9 أنتج مصدر للتيار المتردد متصل بهوائي فرق جهد متذبذب عبر الهوائي. أدى إلى تسريع الإلكترونات، فنشأ مجال كهربائي متذبذب. ينشئ المجال الكهربائي المتغير مجالاً مغناطيسيًا متغيرًا (غير معروض)، وهذا المجال المغناطيسي المتغير ينشئ بدوره مجالاً كهربائياً متغيرًا. وتستمر هذه العملية وتنتشر الموجات الكهرومغناطيسية بعيدًا عن الهوائي.

نقل الموجات الكهرومغناطيسية

قرأت أن موجات الراديو وموجات المايكروويف يمكن أن تحمل معلومات. فكيف يتم بث هذه الموجات – والمعلومات التي تحملها؟

الانتشار في الفضاء يتم بث موجات الراديو والمايكروويف في الفضاء عن طريق أجهزة إرسال متصلة بهوائيات. **جهاز الإرسال** هو عبارة عن جهاز يحوِّل الأصوات أو الموسيقى أو الصور أو البيانات إلى إشارات إلكترونية، ويضخِّم هذه الإشارات ثم يرسلها إلى الهوائي. وينتج **الهوائي** موجات كهرومغناطيسية تنتشر عبر الهواء. فكيف يفعل الهوائي هذا؟

ينتج جهاز الإرسال فرق جهد متذبذب عبر الهوائي المعدني فيعمل على تسريع الإلكترونات في المعدن. ويعمل تسارع الإلكترونات على إنشاء مجال كهربائي متذبذب ينتشر بعيدًا عن الهوائي. يمكنك أن ترى كيف يتكون المجال الكهربائي من الهوائي في **الشكل 9**.

بينما لا يظهر في **الشكل 9** المجال المغناطيسي المتغير الناشئ عن المجال الكهربائي المتغير. وينتشر المجال المغناطيسي بعيدًا عن الهوائي بنفس السرعة التي ينتشر بها المجال الكهربائي، ولكن في اتجاه متعامد عليه وعلى اتجاه الانتشار. لاحظ أن الموجة الكهرومغناطيسية التي نتجت عن الهوائي مستقطبة؛ بمعنى أن مجالها الكهربائي في مستوى يوازي موصِّل الهوائي.

الانتشار في المادة يمكن للموجات الكهرومغناطيسية أن تنتقل عبر المادة والهواء. ويعد ظهور ضوء الشمس الساطع من خلال كوب من الماء مثالاً على انتقال موجات الضوء عبر ثلاثة أنواع من المادة، الهواء والزجاج والماء. مع العلم أن هذه المواد عازلة. **العازل كهربائي** مادة رديئة التوصيل للتيار الكهربائي تتأثر شحنته كهربائية جزئيًا بالمجال الكهربائي. وفي العادة تكون سرعة الموجات الكهرومغناطيسية في العازل الكهربائي أقل من سرعتها في الفراغ؛ ويمكنك حساب سرعة الموجة في أي عازل كهربائي عن طريق المعادلة التالية:

$$v = \frac{c}{\sqrt{k}}$$

في هذه المعادلة، تُقاس سرعة الموجة (v) بوحدة المتر لكل ثانية، وتساوي سرعة الضوء (c) 3.00×10^{8} m/s؛ وثابت العزل كهربائي النسبي (k) كمية لا بعدية. وفي الفراغ، فإن $k = 1.00000$، وسرعة الموجة تساوي c. وفي الهواء، فإن $k = 1.00054$، وتنتقل الموجة الكهرومغناطيسية بسرعة تقل قليلاً عن c. وثابت العزل الكهربائي يساوي مربع معامل الانكسار، $k = n^2$، وبالتالي فإن $\sqrt{k} = n$.

تجربة مصغرة

إشارات الموجة
كيف تعمل أجهزة التحكم عن بعد؟

تطبيقات

19. ما هي سرعة الموجة الكهرومغناطيسية التي تنتقل عبر الهواء؟ استخدم في حساباتك القيمة التالية $c = 299{,}792{,}458$ m/s.

20. يبلغ ثابت العزل الكهربائي للماء 1.77. فما هي سرعة الضوء في الماء؟

21. سرعة الضوء أثناء انتقاله في إحدى المواد تساوي 2.43×10^8 m/s. فكم يبلغ ثابت العزل الكهربائي لهذه المادة؟

22. **التحدي** تم إرسال إشارة راديو من سطح الأرض إلى سطح القمر حيث قطعت مسافة 376,290 km. فما أقصر زمن يمكن أن نتوقع فيه ردًا؟

إنتاج الموجات الكهرومغناطيسية

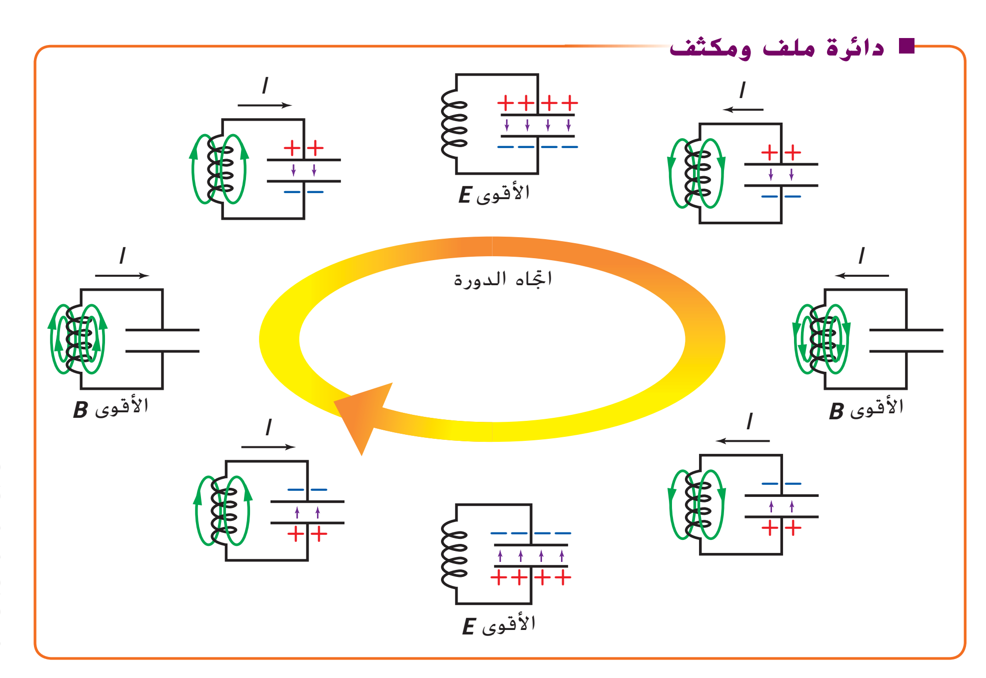
لنفترض أنك قمت توًا بضبط الراديو على محطتك المفضلة. فكيف تقوم المحطة بتحويل موجات الراديو التي تستمع إليها على صورة موسيقى؟

الموجات الحاملة تم تخصيص طول موجي محدد من الموجات الراديوية في الطيف الكهرومغناطيسي لكل محطة راديو تجارية في الإمارات العربية المتحدة يُعرف باسم **الموجة الحاملة**. وبالتالي فإن محطة الراديو تبث الموسيقى أو غير ذلك من المعلومات عن طريق تغيير موجتها الحاملة بتعديل ترددها أو سعتها. ويحدث هذا من خلال جهاز الإرسال الموجود في المحطة.

يحتوي جهاز الإرسال على ثلاثة أجزاء. المذبذب الذي ينشئ الموجة الحاملة. المغيِّر ويعمل على استخدام الموسيقى أو الصور أو الكلمات أو غير ذلك من البيانات في تغيير تردد الموجة الحاملة أو سعتها. والمضخم ويعمل على زيادة فرق جهد الإشارة الناتجة.

ضبط تردد التذبذب لإنشاء موجات حاملة يصل ترددها إلى 400 MHz. يستخدم المذبذب ملفًا ومكثفًا متصلين على التوالي. وتولِّد دائرة المذبذب فرق جهد عبر المكثف ينشئ مجالاً كهربائيًا ويخزِّن الشحنات في المكثف. وعند إزالة فرق الجهد، يفصل المكثف وتتدفق الإلكترونات المخزونة عبر الملف. وينشئ التيار الكهربائي مجالاً مغناطيسيًا متغيرًا يستحث قوة دافعة كهربائية عبر الدائرة. وتعيد القوة الدافعة الكهربائية شحن المكثف في الاتجاه المعاكس، وتتكرر العملية في الاتجاه المعاكس. وفيما يلي دورة تذبذب كاملة في **الشكل 10**.

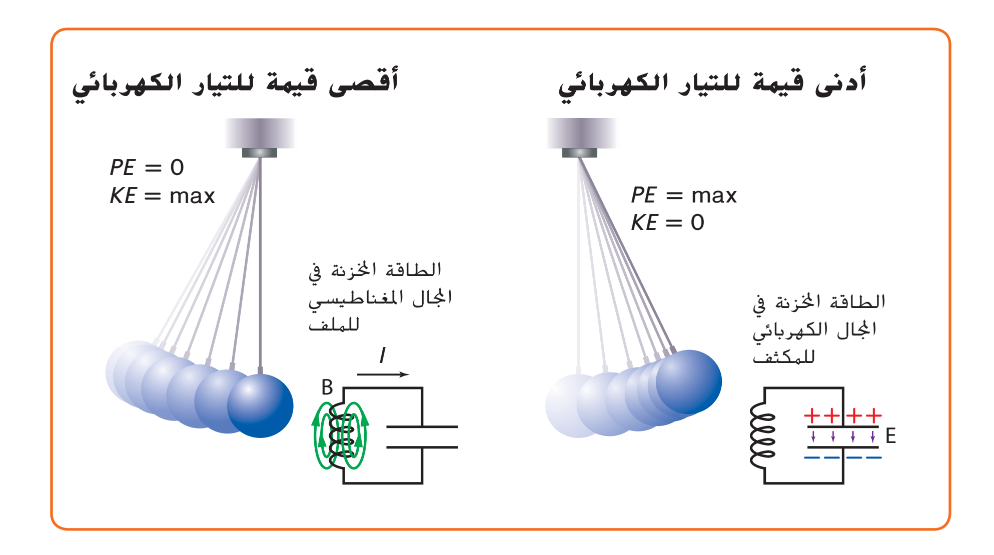
■ **دائرة ملف ومكثف**



الشكل 10 في دورة تذبذب كاملة لدائرة الملف والمكثف، كان المجال المغناطيسي في أقوى مستوياته عندما كان المجال الكهربائي في أضعف مستوياته. ويساوي عدد الذبذبات في الثانية الواحدة تردد الموجات الناتجة. إذا تغيرت قدرة الملف على تخزين الطاقة الكهرومغناطيسية أو تغيرت السعة الكهربائية، فسيتغير تردد التذبذبات.

الشكل 11 تشبه الإلكترونات في دائرة الملف والمكثف ثقل البندول. فعندما يتأرجح ثقل البندول، تتغير إزاحته. والنقطة التي يتوقف عندها ثقل البندول تشبه التيار الصفري في الدائرة.

احسب ما شحنة المكثف عندما يكون التيار في أقصى مستوياته؟



مثال تأرجح البندول يمكنك مقارنة عملية التفريغ والشحن التي تتم في دائرة الملف والمكثف بالتذبذبات الدورية لبندول متأرجح كما يظهر في **الشكل 11**. تمثّل إزاحة ثقل البندول من الخط الرأسي الإلكترونات في دائرة الملف والمكثف.

يصل الثقل المتحرك إلى أقصى سرعة له عند أدنى نقطة في مساره. وهذه النقطة في مسار حركة البندول، والتي تظهر على يسار **الشكل 11**، تشبه في الدائرة النقطة التي يكون تدفق الإلكترونات في الملف عندها في أقصى مستوياته وتكون شحنة المكثف صفر. عندما يصل ثقل البندول إلى أعلى نقطة في مساره، كما يظهر في **الشكل 11**، تبلغ إزاحته أقصاها وتكون سرعته صفر. ويشبه هذا في الدائرة النقطة التي تبلغ عندها شحنة المكثف أقصاها وينعدم تدفق الإلكترونات في الملف.

يحصل البندول في **الشكل 11** على طاقة حركية (KE) بسبب حركته. كما أن لديه طاقة وضع (PE) بسبب إزاحته. يظل مجموع PE و KE الطاقة الميكانيكة —ثابتًا على مدار حركة البندول. ويشبه هذا دائرة الملف والمكثف. هناك طاقة في المجال المغناطيسي للدائرة، والذي ينتجه الملف، وفي المجال الكهربائي لها والذي ينتجه المكثف. وعندما يكون التيار في أقصى مستوياته، تكون الطاقة بأكملها مخزونة في المجال المغناطيسي. وعندما ينعدم التيار، تكون الطاقة بأكملها مخزونة في المجال الكهربائي. ويظل إجمالي طاقة الدائرة (مجموع الطاقه في المجال المغناطيسي والمجال الكهربائي) ثابتًا.

التذبذبات المستقرة مثلما يؤدي الاحتكاك إلى توقف حركة البندول إذا تُرك بمفرده، كذلك تسكن التذبذبات في الملف والمكثف بمرور الوقت بسبب انتشار الطاقة في صورة موجات كهْرَمغناطيسية وبسبب مقاومة الدائرة. وبإضافة طاقة إلى كلا النظامين، تستمر التذبذبات. فالدفعات اللطيفة للبندول في الأوقات المناسبة ستجعله يستمر في التأرجح. وتبلغ سعة اهتزاز البندول أقصاها عندما يتطابق تردد الدفعات مع تردد حركة الاهتزاز وتكون متفقة في الطور. وهذه هي حالة الرنين التي قرأت عنها في وحدة سابقة.

ومثلما تفيد الدفعات اللطيفة في استمرار حركة البندول، كذلك تعمل فروق الجهد المطبقة على دائرة الملف والمكثف بالتردد الملائم على استمرار التذبذبات. ومن بين طرق القيام بذلك إضافة ملف ثاني إلى الدائرة لإنشاء محوّل. كيف يعمل المحول على استمرار تذبذبات الدائرة؟

كما يظهر في **الشكل 12**، يعمل مذبذب جهاز الإرسال على زيادة فرق جهد التيار المتردد المُستحث في الملف الثانوي للمحول. ثم يُضاف التيار ثانيةً إلى الملف والمكثف. ويتيح هذا للدائرة أن تواصل تذبذباتها.

الترددات في التجويف الرنان يمكن زيادة التردد الناشئ عن دائرة ملف ومكثف عن طريق خفض قدرة الملف على تخزين الطاقة المغناطيسية وتقليل السعة الكهربائية للمكثف. تصبح الملفات والمكثفات غير مفيدة في حالة الترددات التي تتجاوز 400 MHz.

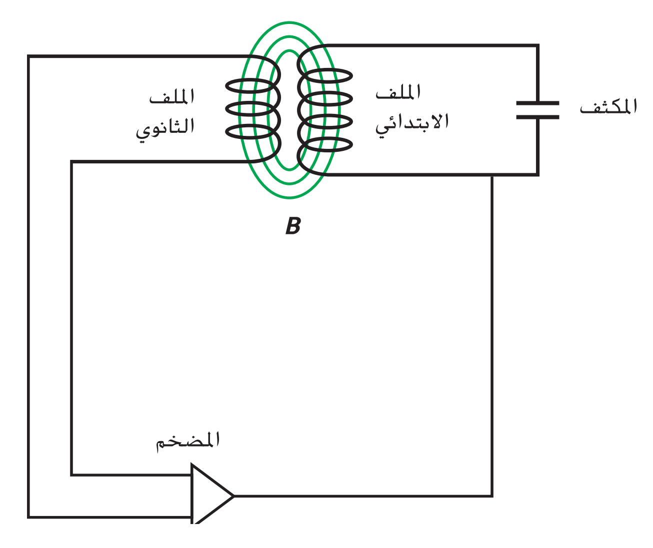
تنشأ موجات المايكروويف التي تتراوح تردداتها ما بين 0.4 GHz إلى 100 GHz عن استخدام التجويف الرنان، وهو عبارة عن صندوق فلزي مستطيل الشكل يعمل كملف ومكثف في نفس الوقت. ويتحكم حجم الصندوق في تردد التذبذب. لاحظ أنه في أفران المايكروويف، لا يؤثر حجم الفرن نفسه في تردد الموجة؛ وإنما حجم التجويف الرنان بالفرن فقط هو الذي يؤثر في التردد.

لإنتاج موجات تتجاوز تردداتها 100 GHz، يجب تقليل حجم التجويف الرنان إلى حجم الجزيء. تتولد الأشعة تحت الحمراء، على سبيل المثال، عن طريق اهتزاز النوى داخل الجزيئات. وتتولد موجات الضوء عالية التردد والموجات فوق البنفسجية وأشعة إكس بسبب حركة الإلكترونات داخل الذرات. وتتولد موجات جاما، التي تعد الأعلى ترددًا، بسبب تسارع الشحنات في الأنوية الذرية.

☑ **التأكد من فهم النص** **التقييم** **لماذا لا يمكن استخدام التجويف الرنان لتوليد الأشعة تحت الحمراء؟**

الموجات الناتجة بواسطة الكهرباء الإجهادية وهناك طرق أخرى لتوليد فروق جهد متذبذبة لأجهزة الإرسال. فعلى سبيل المثال، تتشوه بلورات الكوارتز عند تعريضها لفرق جهد كهربائي، وهي الخاصية التي تُعرف باسم **الكهرباء الإجهادية.** وعند استعمال فرق جهد التيار المتردد لقطع جزء من بلورة الكوارتز، تنشأ تذبذبات متواصلة. ومثلما تهتز قطعة المعدن بتردد معين عند ثنيها ثم إطلاقها، كذلك تفعل بلورات الكوارتز. وكلما قل سمك البلورة، زاد تردد اهتزازها.

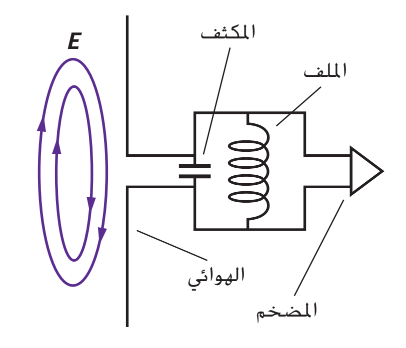
وتنشأ عن خاصية الكهروضغطية في البلورات قوة دافعة كهربائية عند تشوه البلورة. وهذه القوة الدافعة كهربائية تنتج عن تردد اهتزاز البلورة، وبالتالي يمكن تضخيمها وإعادتها إلى البلورة لجعلها تواصل الاهتزاز. وبسبب ترددات الاهتزاز الثابتة تقريبًا، تُستخدم بلورات الكوارتز على نطاق واسع لإنشاء الموجات الكهرومغناطيسية في الهواتف الخلوية وأجهزة التلفاز والهواتف اللاسلكية وأجهزة توجيه WiFi اللاسلكية وأجهزة الكمبيوتر.



الشكل 12 يساوي تردد التيار المتذبذب المضخم الناتج عن الملف الثانوي للمحول تردد دائرة الملف والمكثف. وبالتالي يعمل التيار المضخم على استمرار التذبذبات.

استقبال الموجات الكهرومغناطيسية

تنشر الهوائيات موجات كهُرومَغناطيسية في الفضاء. وتلتقط الهوائيات الموجات الكهرومغناطيسية ، وتحوِّل المجالات الكهربائية المتذبذبة مرة أخرى إلى فروق جهد. فكما يظهر في **الشكل 13**، يعمل المجال الكهربائي للموجة على تسريع الإلكترونات في الجزء المعدني بالهوائي. يبلغ التسارع أقصاه عند وضع الهوائي في نفس اتجاه استقطاب الموجة؛ أي عندما يكون موازيًا لاتجاه المجال الكهربائي للموجة. ويتذبذب فرق الجهد بين طرفي الهوائي بنفس تردد الموجة.



الشكل 13 تعمل المجالات الكهربائية المتغيرة الناشئة عن إشارة محطة الراديو على تسريع الإلكترونات في الهوائي. ثم يمكن بعد ذلك فك ترميز المعلومات التي تحملها الإشارة وتضخيمها واستخدامها في تشغيل مكبر للصوت.

سلك الهوائي عندما يكون طول الهوائي مساويًا لنصف طول الموجة التي صُمم لالتقاطها، فإن فرق الجهد بين طرفي الهوائي يكون في أعلى مستوياته ويكون الهوائي أكثر كفاءة. وبالتالي فالهوائي المصمم لاستقبال موجات الراديو يكون أطول من الهوائي المصمم لاستقبال موجات المايكروويف.

وعلى الرغم من أن الهوائي الذي يبلغ طوله نصف طول الموجة هو الأكثر كفاءة، إلا أن الهوائي الذي يبلغ طوله ربع طول الموجة هو الذي يُستخدم في العادة عندما يكون الاتصال بين الهوائي وجهاز الاستقبال في الطرف وليس في منتصف الهوائي. يمكن تقصير الهوائي عن طريق صناعته من ملف حلزوني أو بإضافة مادة عازلة كالسيراميك، بمعامل عزل كهربائي أعلى من الهواء.

تحتوي الهواتف الخلوية على سبعة هوائيات. وتتصل هذه الهواتف في العادة على ترددات قريبة من 875 MHZ و 1850 MHZ و 2050 MHz. وتتلقى إشارات نظام تحديد المواقع على تردد 1.575 GHz. وتُرسل وتستقبل إشارات سماعات الأذن عن بعد وإشارات WiFi على تردد 2.45 GHz. ويبلغ طول هوائيات الهواتف الخلوية المُقامة على كتل سيراميكية عازلة باستخدام موصلات مطبوعة بضعة ملليمترات فقط. كذلك تحتوي أجهزة الكمبيوتر المحمولة على عدة هوائيات لاستيعاب شبكة WiFi والأجهزة المتصلة عن بعد.

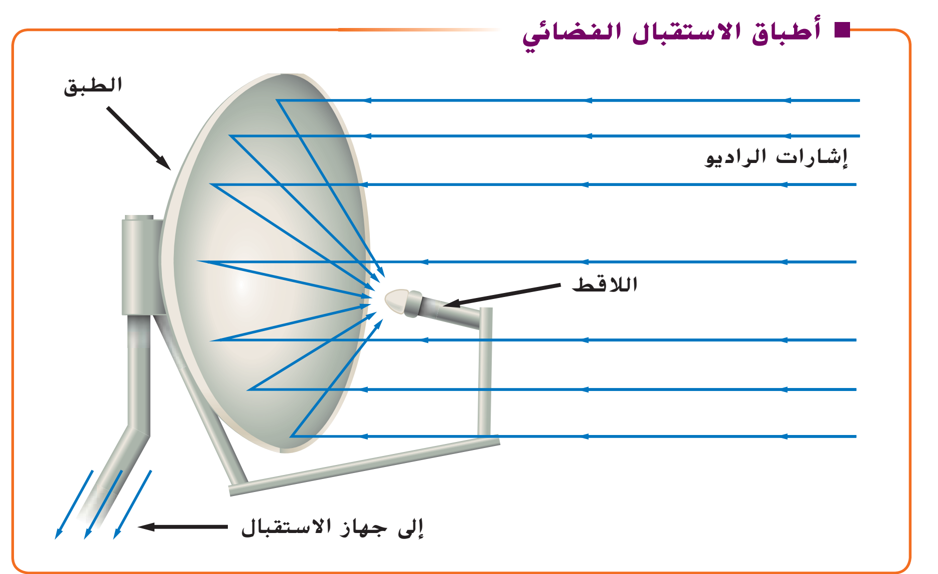
أطباق الاستقبال الفضائي تتعرض جميع الموجات الكهرومغناطيسية، وليس فقط موجات الضوء، للانعكاس أو الانكسار أو الحيود. وتعكس أطباق الاستقبال الفضائي، كالطبق المُبين في **الشكل 14**، إشارات الراديو القصيرة مثلما تعكس المرايا المقعرة موجات الضوء. وتعكس أطباق الاستقبال الفضائي الإشارات من على سطحها وتركزها في اللاقط. ويحتوي اللاقط، المدعوم بحامل ثلاثي الأرجل على الطبق الرئيسي، على هوائي قصير ثنائي القطب. وكما أن التلسكوب لا يُظهر سوى جزء ضيق من السماء، فإن طبق الاستقبال الفضائي يكون حساسًا فقط للإشارات القادمة من اتجاهات معينة.

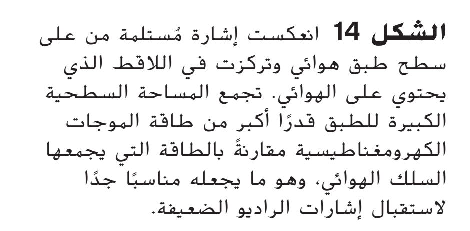
مختبر الفيزياء

صد الموجات

هل يمكنك منع انتقال موجات الراديو؟

■ **أطباق الاستقبال الفضائي**





الشكل 14 انعكست إشارة مُستلمة من على سطح طبق هوائي وتركزت في اللاقط الذي يحتوي على الهوائي. تجمع المساحة السطحية الكبيرة للطبق قدرًا أكبر من طاقة الموجات الكهرومغناطيسية مقارنةً بالطاقة التي يجمعها السلك الهوائي، وهو ما يجعله مناسبًا جدًا لاستقبال إشارات الراديو الضعيفة.

تحويل الموجات إلى معلومات بعد أن يقوم الهوائي بتحويل المجالات الكهربائية للطاقة الكهرومغناطيسية إلى فروق جهد، فإنه يرسل فروق الجهد هذه إلى **جهاز الاستقبال**، الذي يحولها إلى معلومات قابلة للاستخدام — أصوات أو صور أو بيانات. تصطدم الموجات ذات الترددات المختلفة بالهوائي وتدخل إلى جهاز الاستقبال في آن واحد. فكيف يحدد جهاز الاستقبال الموجات التي تحمل المعلومات المطلوبة فقط؟

لاختيار موجات ذات تردد معين (ورفض الموجات الأخرى) يستخدم جهاز الاستقبال موالف. ويحتوي الموالف على دائرة ملف ومكثف أو تجويف رنان. فعندما تدير قرص الراديو، فأنت بذلك تختار محطة الراديو المطلوبة ويتم ضبط السعة كهربائية إلى أن يتساوى تردد تذبذب الدائرة مع تردد الموجة المطلوبة. وعندها يمكن للموجات ذات التردد المطلوب فقط أن تنتج فروق جهد متذبذبة بسعة كبيرة في جهاز الاستقبال.

الإشارات معدلة التردد ومعدلة السعة قرأت أن الموجات الكهرومغناطيسية يمكن أن تحمل معلومات إذا نجحت هذه المعلومات في تغيير أو تعديل إحدى خصائص الموجة. تتباين الموجات الحاملة لمحطة الراديو إما في السعة (AM أو تعديل السعة) أو في التردد (FM أو تعديل التردد). حيث تبث محطات الراديو التجارية معدلة السعة في نطاق 550–1650 kHz، بينما تبث محطات الراديو التجارية معدلة التردد على تردد يتراوح ما بين 88 إلى 108 MHz يقل تعرض الإشارات معدلة التردد للضجيج، وذلك لأن معظم مصادر الضجيج، كالبرق، تنشئ موجات متباينة السعة لا تتأثر بها أجهزة الاستقبال معدلة التردد.

التأكد من فهم النص **التطبيق ما السبب الذي يجعل الهوائيات معدلة السعة أطول من الهوائيات معدلة التردد؟**

الإشارات الرقمية هناك العديد من خدمات الراديو، بما في ذلك الإذاعة التجارية وخدمات الطوارئ وأجهزة الاستقبال ثنائية الاتجاه، التي تستخدم ترددات أخرى وتستخدم إما تعديل السعة أو تعديل التردد. تقوم الهواتف الخلوية وأجهزة التلفاز والكمبيوتر بتحويل الأصوات والصور والبيانات إلى إشارات رقمية. والإشارات الرقمية عبارة عن سلسلة من نبضات الجهد. وفي العادة، يتم ترميز النبضات بالنظام الثنائي 0 و1. وهذا النظام يتباين في المدة، وليس في السعة أو التردد. ويمكن للإشارات الرقمية أن تحتوي على مزيد من المعلومات في نفس مقدار الوقت، مثل الإشارات معدلة السعة أو الإشارات معدلة التردد، كما أنها أقل تأثرًا بالضجيج.



التلفاز الرقمي فإشارات التلفاز التناظرية، مثلها مثل إشارات الراديو معدل السعة وإشارات الراديو معدل التردد، يتم بثها عن طريق تغيير الموجات الحاملة. وأصبحت محطات التلفاز في الوقت الحالي مقتصرة على بث الإشارات الرقمية، والتي يتم ترميزها بالرقمين 0 و1— الكود الرقمي المستخدم في أجهزة الكمبيوتر. ويمكن ضغط عرض النطاق الترددي للتلفاز الرقمي لبث أربع أو خمس قنوات أو أكثر على نفس تردد الموجة الحاملة التي تستخدمها قناة واحدة في التلفاز التناظري. ويتميز التلفاز الرقمي بأصوات عالية الدقة ويحمل معلومات الصورة بنسبة تصل إلى خمسة أضعاف.



القسم 2 مراجعة

23. **الفكرة** الرئيسة اشرح كيف تنتشر الموجات الكهرومغناطيسيه في الفضاء.

24. **الموجات الكهرومغناطيسية** اذكر بعض الخصائص الأساسية للموجات الكهرومغناطيسية. ما وجه الاختلاف بين الموجات الكهرومغناطيسية وموجات الصوت والموجات الأخرى؟ اشرح.

25. **التردد** إذا كان الطول الموجي لموجة كهرومغناطيسية يساوي 1.5×10^{-5} m. فما هو ترددها؟

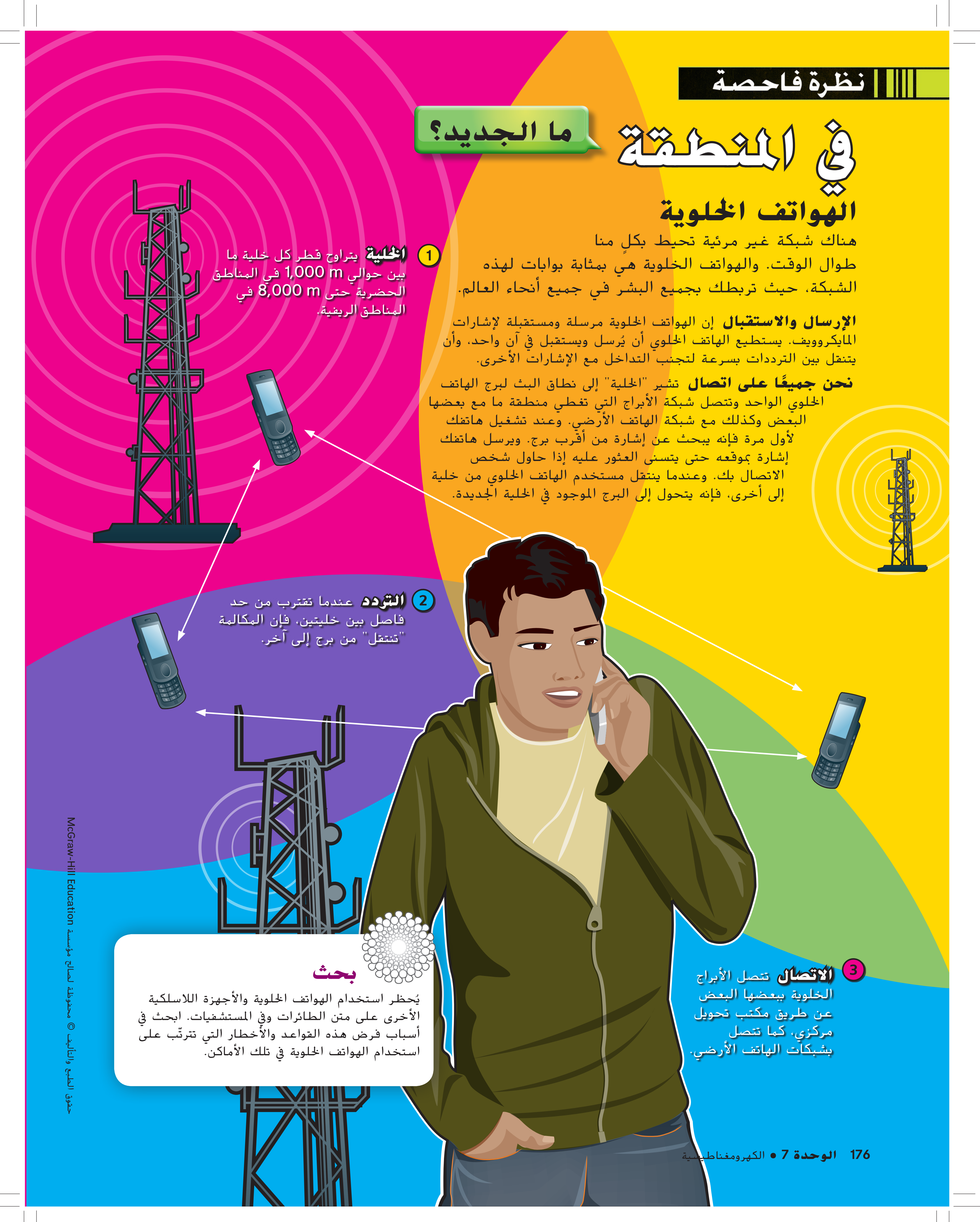
26. **إشارات الراديو** في الغالب تحتوي هوائيات الراديو على عمود معدني يوجَّه أفقيًا. من هذه المعلومة، ما الذي يمكنك أن تستنتجه بشأن اتجاهات المجالات الكهربائية في إشارات الراديو.

27. **أطباق الاستقبال الفضائي** لماذا يعد من المهم توجيه هوائي الاستقبال بأطباق القطع المكافئ مباشرةً نحو جهاز الإرسال؟

28. **تصميم الهوائي** هل الهوائي المعدل التردد والمصمم ليكون أكثر حساسية للمحطات التي يقترب ترددها من 88 MHz سيكون أقصر أم أطول من الهوائي المصمم لاستقبال المحطات القريبة من 108 MHz؟ اشرح استدلالك.

29. **ثابت العزل الكهربائي** سرعة الضوء أثناء انتقاله في مادة مجهولة تساوي 1.98×10^{8} m/s. فإذا علمنا أن سرعة الضوء في الفراغ تساوي 3.00×10^{8} m/s، فكم يبلغ ثابت العزل الكهربائي لهذه المادة المجهولة؟

30. **التفكير الناقد** تحجب طبقة الأوزون الموجودة في الغلاف الجوي للأرض معظم الأشعة فوق البنفسجية التي ترسلها الشمس. وقد وجد العلماء أن طبقة الأوزون قد ترققت فوق القارة القطبية الجنوبية ونصف الكرة الجنوبي. استخدم ما تعلمته عن الموجات الكهرومغناطيسية لتفسير مخاوف العلماء من ترقق طبقة الأوزون.



نظرة فاحصة

ما الجديد؟

في المنطقة

الهواتف الخلوية

هناك شبكة غير مرئية تحيط بكلٍ منا طوال الوقت. والهواتف الخلوية هي بمثابة بوابات لهذه الشبكة، حيث تربطك بجميع البشر في جميع أنحاء العالم.

الإرسال والاستقبال إن الهواتف الخلوية مرسلة ومستقبلة لإشارات المايكروويف. يستطيع الهاتف الخلوي أن يُرسل ويستقبل في آن واحد، وأن يتنقل بين الترددات بسرعة لتجنب التداخل مع الإشارات الأخرى.

نحن جميعًا على اتصال تشير "الخلية" إلى نطاق البث لبرج الهاتف الخلوي الواحد وتتصل شبكة الأبراج التي تغطي منطقة ما مع بعضها البعض وكذلك مع شبكة الهاتف الأرضي. وعند تشغيل هاتفك لأول مرة فإنه يبحث عن إشارة من أقرب برج. ويرسل هاتفك إشارة بموقعه حتى يتسنى العثور عليه إذا حاول شخص الاتصال بك. وعندما ينتقل مستخدم الهاتف الخلوي من خلية إلى أخرى، فإنه يتحول إلى البرج الموجود في الخلية الجديدة.

1 **الخلية** يتراوح قطر كل خلية ما بين حوالي 1,000 m في المناطق الحضرية حتى 8,000 m في المناطق الريفية.

2 **التردد** عندما تقترب من حد فاصل بين خليتين، فإن المكالمة "تنتقل" من برج إلى آخر.

3 **الاتصال** تتصل الأبراج الخلوية ببعضها البعض عن طريق مكتب تحويل مركزي، كما تتصل بشبكات الهاتف الأرضي.

بحث

يُحظر استخدام الهواتف الخلوية والأجهزة اللاسلكية الأخرى على متن الطائرات وفي المستشفيات. ابحث في أسباب فرض هذه القواعد والأخطار التي تترتّب على استخدام الهواتف الخلوية في تلك الأماكن.

الوحدة 7 دليل الدراسة

الفكرة الرئيسة ترتبط الموجات الكهرومغناطيسية وتتولد من تذبذب المجالات الكهربائية والمغناطيسية الناشئة عن تسارع الإلكترونات.

القسم 1 تأثير القوى الكهربائية والمغناطيسية على الجسيمات

المفردات
- النظير isotope
- مطياف الكتلة mass spectrometer

الفكرة الرئيسة يمكن استخدام انحراف الجسيمات المتحركة في المجالات الكهربائية والمغناطيسية لمعرفة خصائص هذه الجسيمات.

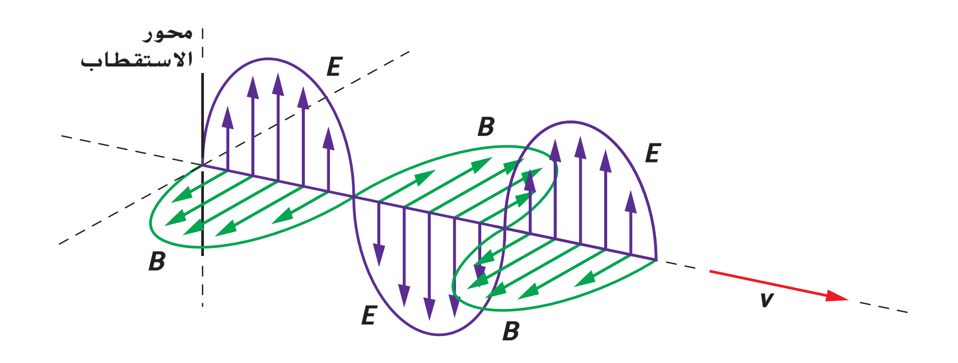
- باستخدام المجال الكهربائي والمغناطيسي لجعل حزمة الإلكترونات تنحرف داخل أنبوب مفرغ من الهواء —أنبوب أشعة الكاثود— استطاع جوزيف جون طومسون قياس نسبة شحنة الإلكترون إلى كتلته. وبعدها قاس روبرت ميليكان شحنة الإلكترون، وبالتالي جعل من الممكن قياس كتلته.
- عُرفت نسبة شحنة الإلكترون أو شحنة البروتون إلى كتلته باستخدام مجالات كهربائية ومغناطيسية متقاطعة أولاً لمعرفة سرعة الجزيء ثم استخدام مجال مغناطيسي لجعل الجزيء ينحرف.
- يستخدم مطياف الكتلة مجالات كهربائية ومغناطيسية لفصل وقياس كتل الجزيئات والذرات المتأينة. حيث يعطي المجال الكهربائي طاقة حركية محددة للأيون وفي المجال المغناطيسي، يأخذ الأيون مسارًا دائريًا يعتمد على كتلة الأيون وشحنته.

القسم 2 المجالات الكهربائية والمغناطيسية في الفضاء

المفردات
- الموجة الكهرومغناطيسية electromagnetic wave
- الطيف الكهرومغناطيسي electromagnetic spectrum
- الإشعاع الكهرومغناطيسي electromagnetic radiation
- جهاز الإرسال transmitter
- الهوائي antenna
- العازل الكهربائي dielectric
- الموجة الحاملة carrier wave
- الكهروضغطية piezoelectricity
- جهاز الاستقبال receiver

الفكرة الرئيسة ترتبط الموجات الكهرومغناطيسية وتعمل على تذبذب المجالات الكهربائية والمغناطيسية التي تنتقل عبر الفضاء وتتفاعل مع المادة.

- تتذبذب المجالات الكهربائية والمغناطيسية التي تتألف منها الموجة الكهرومغناطيسية في اتجاهات متعامدة على بعضها البعض وفي اتجاه متعامد على اتجاه سرعة الموجة (v).



- يساوي الطول الموجي حاصل قسمة سرعة الموجة على ترددها. سرعه الموجه v الكهرومغناطيسية التي تنتقل عبر الفضاء تساوي سرعة الضوء (c). سرعه v الموجة الكهرومغناطيسية التي تنتقل عبر عازل كهربي تساوي حاصل قسمة سرعة الضوء c على الجذر التربيعي لثابت العزل الكهربائي النسبي (k).
- يمكن للموجات الكهرومغناطيسية أن تحمل معلومات إذا تباينت سعتها أو ترددها بفعل البيانات أو الأصوات أو مقاطع الفيديو التي سيتم إرسالها. يمكن كذلك تشفير الموجات الكهرومغناطيسية عند استخدامها مع المعلومات الرقمية.
- يصبح الهوائي أكثر حساسية وكفاءة عندما يكون طوله مساويًا لنصف أو ربع الطول الموجي للموجة الكهرومغناطيسية التي صُمم لالتقاطها.

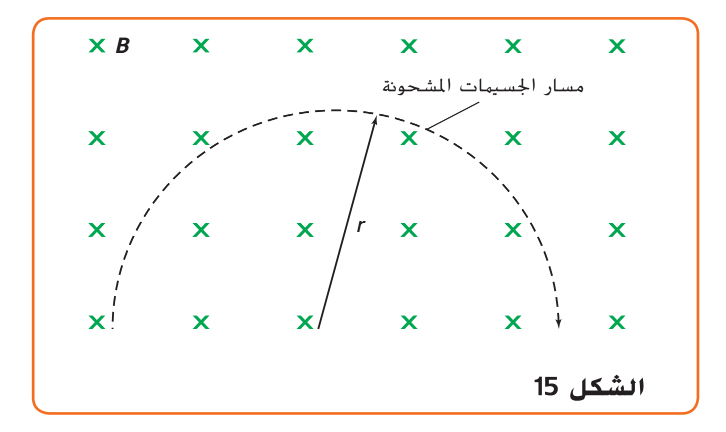
القسم 1 تأثير القوى الكهربائية والمغناطيسية على الجسيمات

إتقان المفاهيم

31. ما المقصود بكتلة الإلكترون وشحنته؟
32. ما المقصود بالنظائر؟
33. ما الذي يجب أن يحدث للإلكترون لتنشأ موجة كهرومغناطيسية؟
34. طُلب منك تحديد تركيبة عينة من التراب المأخوذ من مسرح جريمة. كيف يمكنك استخدام مطياف الكتلة للقيام بهذا الأمر؟

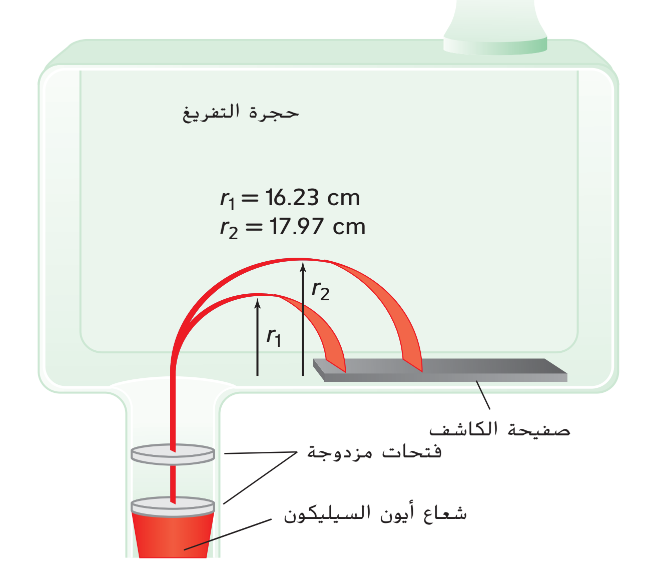
إتقان حل المسائل

35. إذا كانت الإلكترونات تتحرك بسرعة 3.6×10^{6} m/s وتمر عبر مجال كهربائي شدته 5.8×10^{5} V/m. فما مقدار المجال المغناطيسي الذي يجب أن تمر به الإلكترونات لكي لا ينحرف مسارها؟
36. يتحرك بروتون في مجال مغناطيسي شدته 0.036 T كما يظهر في **الشكل 15**. فإذا كان البروتون يتحرك في مسار دائري نصف قطره 0.20 m. فما هي سرعته؟



الشكل 15

37. أظهر مطياف الكتلة البيانات التالية لحزمة متأينة بشكل ثنائي (+2) من ذرات الصوديوم: $B = 8.0\times10^{-2}$ T, $q = 2(1.602\times10^{-19}$ C), $r = 0.077$ m, و $V_{accel} = 156$ V. احسب كتلة ذرة الصوديوم.
38. كتلة جسيم ألفا 6.6×10^{-27} kg وشحنته +2. وهذا الجسيم يتحرك في مجال مغناطيسي شدته 0.20 T بمسار نصف قطره 0.090 m.
    a. ما فرق الجهد المطلوب لمنح الجسيم السرعة المطلوبة؟
    b. كم تبلغ الطاقة الحركية للجسيم؟
    c. ما سرعة الجسيم؟
39. **مسألة عكسية** ضع سؤالاً ينطوي على الكميات التالية: $q = 1.1602\times10^{-19}$ C, $m = 12\ (1.67\times10^{-27}$ kg), $V_{accel} = 515$ V, B = 75 mT.
40. **الترتيب** تدخل الجسيمات المناطق ذات المجالات المغناطيسية على النحو المبين أدناه. رتِّب هذه الجسيمات على أساس نصف قطر المسار الدائري الذي تسير فيه، من الأصغر إلى الأكبر. وضِّح ما إذا كانت هناك أنصاف أقطار متساوية.
    A. بروتون يدخل مجالاً مغناطيسيًا شدته 0.12 T بسرعة تساوي 4.0×10^{3} m/s
    B. بروتون يدخل مجالاً مغناطيسيًا شدته 0.12 T بسرعة تساوي 8.0×10^{4} m/s
    C. بروتون يدخل مجالاً مغناطيسيًا شدته 0.24 T بسرعة تساوي 4.0×10^{3} m/s
    D. إلكترون يدخل مجالاً مغناطيسيًا شدته 0.12 T بسرعة تساوي 4.0×10^{3} m/s
    E. إلكترون يدخل مجالاً مغناطيسيًا شدته 0.24 T بسرعة تساوي 8.0×10^{4} m/s
41. في مطياف الكتلة، تتحرك ذرات السيليكون المتأينة في مسارات منحنية، كما هو مبين في **الشكل 16**. فإذا كان أصغر نصف قطر لمسار إحداها يكافئ كتلة 28 بروتون، فكم تبلغ كتلة نظائر السيليكون الأخرى؟



الشكل 16

42. يتسارع إلكترون بفرق جهد يساوي 4.5 kV. فما شدة المجال المغناطيسي الذي يجب أن يمر به الإلكترون إذا كان نصف قطر مساره الدائري يساوي 5.0 cm؟

القسم 2 المجالات الكهربائية والمغناطيسية في الفضاء

إتقان المفاهيم

43. **الفكرة الرئيسة** اشرح كيفية استخدام الهوائي لإرسال واستقبال موجات الراديو.
44. لماذا يُستخدم مذبذب لإنشاء موجات كهرومغناطيسية؟ في حالة استخدام بطارية أو مولد تيار مستمر، هل يمكنه إنشاء موجات كهرومغناطيسية؟

45. ارسم المجالات الكهربائية والمغناطيسية الناشئة عن سلك هوائي رأسي وهو يرسل موجات راديو.

46. ما الذي يحدث لبلورات الكوارتز عند تعرضها لفرق جهد كهربائي؟

إتقان حل المسائل

47. **أطباق الاستقبال الفضائي** يبلغ الطول الموجي لموجات الراديو التي تعكسها أطباق الاستقبال الفضائي 2.0 cm. فما طول الهوائي الذي يلتقط هذه الموجات؟

48. **ماسح الباركود** يستخدم ماسح الباركود مصدر ضوء ليزر طوله الموجي حوالي 650 nm. حدد تردد الليزر.

49. **موجات الراديو القصيرة** يبلغ طول هوائي الاستقبال 4.8 m. فما تردد الإشارة التي يلتقطها بشكل جيد؟

50. ما الطول الأمثل للهوائي المصمم لالتقاط إشارة راديو معدلة التردد ترددها 101.3 MHz؟

51. موجة كهرومغناطيسية ترددها 100 MHz يتم إرسالها عبر كابل متحد المحور بثابت عزل كهربائي يساوي 2.30. فما سرعة الموجة؟

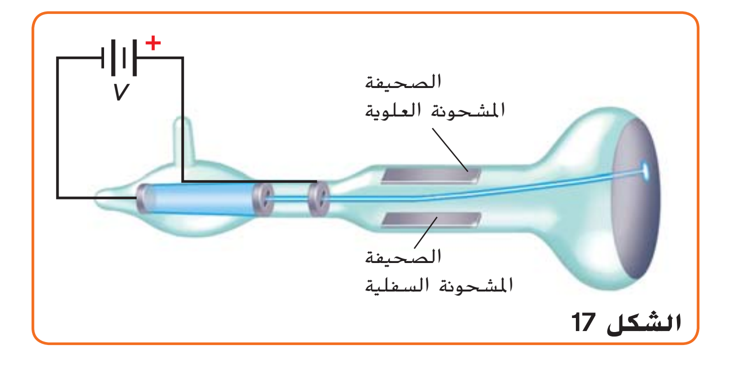
52. **الهاتف الخلوي** يعمل جهاز الإرسال في الهاتف الخلوي على تردد ناقل يساوي 8.00×10^{8} Hz. فما الطول الأمثل للهوائي المصمم لالتقاط هذه الإشارة؟ لاحظ أن الهوائيات ذات الطرف الواحد، كتلك التي تستخدمها الهواتف الخلوية، تنشئ موجات بأكبر سعة عندما يكون طولها مساويًا لربع الطول الموجي للموجة التي تبثها أو تستقبلها.

تطبيق المفاهيم

53. **مسألة عكسية** اكتب مسألة فيزيائية ذات أهداف مقتبسة من أرض الواقع والتي ستكون المعادلة التالية جزءًا من حلها:

$$q(0.065\ \text{T}) = \frac{m(2.8\times10^{5}\ \text{m/s})}{0.045\ \text{m}}$$

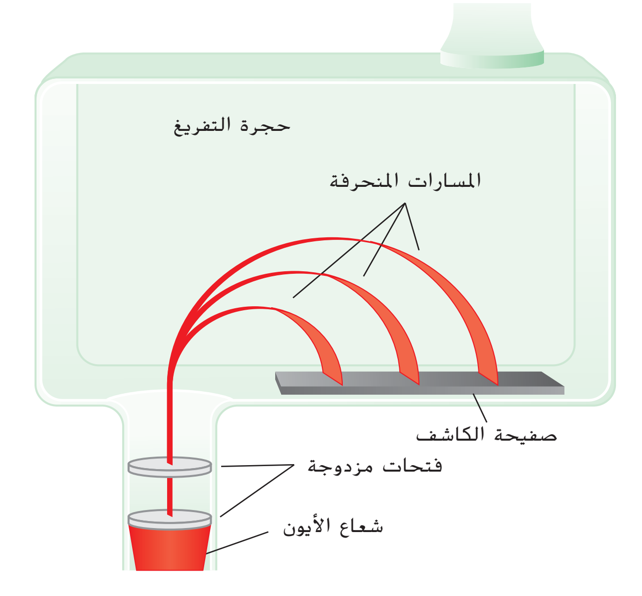
54. تحركت الإلكترونات في أنبوب طومسون في **الشكل** 17 من اليسار إلى اليمين. وانحنت الحزمة إلى الأعلى. فأي من لوحات الانحراف ذات شحنة موجبة؟



الشكل 17

55. اثبت أن وحدات E/B هي نفس وحدات السرعة.

56. تظهر حجرة التفريغ في مطياف الكتلة في **الشكل** 18. إذا تم اختبار عينة من النيون المتأين في مطياف الكتلة، ففي أي اتجاه يجب توجيه المجال المغناطيسي لتنحرف الأيونات في مسار نصف دائري باتجاه عقارب الساعة؟



الشكل 18

57. إذا تغيرت إشارة شحنة الجزيئات في السؤال السابق من موجب إلى سالب، فهل ستتغير اتجاهات كلا المجالين أو أحدهما لتظل الجزيئات في مسارها دون انحراف؟ فسِّر.

58. في كل خاصية من الخصائص التالية، حدد ما إذا كانت موجات الراديو أم موجات الضوء أم أشعة إكس هي صاحبة أكبر قيمة؟
   a. الطول الموجي
   b. التردد
   c. السرعة

59. أنت تقرأ رواية عن كائنات غريبة. وهذه الكائنات لها أعين حساسة لموجات المايكروويف. هل تتوقع أن تكون أعين هذه الكائنات أكبر أم أصغر من عينيك؟ هل تعرف لماذا؟

60. **الهاتف الخلوي** يستخدم الهاتف الخلوي سماعة أذن عن بعد بتردد 2.45 GHz. ويتلقى إشارات نظام تحديد المواقع (GPS) بتردد 1.575 GHz. ويصل إلى نطاقات بترددات 0.90 GHz، 1.90 GHz، 2.05 GHz

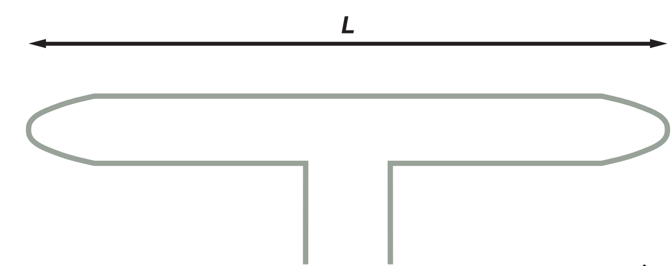
رتِّب الأطوال المثلى للهوائي بحيث يناسب جميع هذه الخدمات، من الأقصر إلى الأطول.

61. **طرح المسائل** أكمل هذه المسألة بحيث يمكن حلها باستخدام المجالين الكهربائي والمغناطيسي: "تساوي سرعة البروتون 3.7×10^{6} m/s في اتجاه الشرق . . . ."

التقويم

مراجعة عامة

62. الراديو تبث محطة راديو FM موجاتها بتردد 94.5 MHz باستخدام الهوائي الموجود في **الشكل 19**. على فرض أن الهوائي يوفّر أفضل استقبال، فما طول الجزء الذي يحمل الحرف L؟



الشكل 19

63. الهاتف الخلوي ما التردد الذي يستخدمه هاتف خلوي به هوائي يبلغ طوله 8.3 cm لإرسال واستقبال الإشارات؟ الطول المثالي للهوائي ذي الطرف الواحد المستخدم في الهواتف الخلوية يساوي ربع الطول الموجي للموجة التي يبثها.

64. يتسارع جزيء مجهول بفعل فرق جهد يساوي 1.50×10^{2} V. ثم دخل الجزيء مجالاً مغناطيسيًا شدته 50.0 mT وأخذ مسارًا منحنيًا نصف قطره 9.80 cm. فما قيمة q/m؟

التفكير الناقد

65. تطبيق المفاهيم تستخدم الكثير من إدارات الشرطة مسدسات الرادار لاكتشاف السائقين الذين يتجاوزون السرعة. ويستخدم مسدس الرادار إشارة كهرومغناطيسية عالية التردد لقياس سرعة الأجسام المتحركة. وتردد الإشارة التي يرسلها مسدس الرادار معروفة. وهذه الإشارة تنعكس من الجسم المتحرك وترتد إلي أداة الاستقبال في مسدس الرادار. ونظرًا لأن الجسم يتحرك بالنسبة لمسدس الرادار، فإن تردد الإشارة المرتدة يختلف عن تردد الإشارة الأصلية المرسلة. وتُعرف هذه الظاهرة باسم تأثير دوبلر. عندما يتحرك الجسم باتجاه مسدس الرادار، يكون تردد الإشارة المرتدة أكبر من تردد الإشارة الأصلية. إذا كان تردد الإشارة الأولية المُرسلة 10.525 GHz وأظهرت الإشارة المرتدة تغيرًا في التردد بقيمة 1850 Hz. فكم تبلغ سرعة الجسم المتحرك؟ استخدم المعادلة التالية:

$$v_{\text{مستهدف}} = \frac{cf_{\text{دوبلر}}}{2f_{\text{منقولة}}}$$

حيث

$V_{\text{مستهدف}}$ = سرعة الهدف (m/s)

c = سرعة الضوء (m/s)

$f_{\text{دوبلر}}$ = تردد تأثير دوبلر (Hz)

$f_{\text{منقولة}}$ = تردد الموجة المرسلة (Hz)

66. تطبيق المفاهيم كتب هربرت جورج ويلز رواية تندرج تحت باب الخيال العلمي تُعرف باسم *The Invisible Man* (الرجل الخفي)، تحدث فيها عن رجل تناول جرعة دواء وأصبح غير مرئي مع احتفاظه بكل قدراته. فسّر السبب الذي يجعل هذا الرجل الخفي غير قادر على الرؤية.

67. تصميم تجربة أنت تصمم مطياف كتلة باستخدام المبادئ التي ناقشناها في هذه الوحدة. وتريد أن تفرّق بين الجسيمات أحادية التأين (1+) والتي تساوي كتلتها كتلة 175 بروتون وبين الجسيمات التي تساوي كتلتها كتلة 176 بروتون، غير أن المسافة بين الخلايا المتجاورة في الكاشف الخاص بك تساوي 0.10 mm. وبالتالي يجب أن تتسارع الجسيمات بفعل فرق جهد لا يقل عن 500.0 V ليتم اكتشافها. اذكر بعض قيم V, B, وr التي يجب أن يحتوي عليها جهازك؟

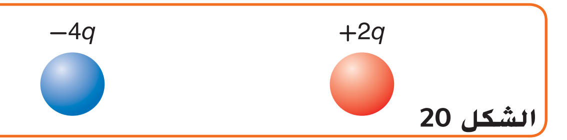
الكتابة في الفيزياء

68. يُستخدم مطياف الكتلة المحمول للكشف عن المتفجرات في المطارات. قم بإجراء بحث على نوع الأدوات المستخدمة. صف بإيجاز الأدوات التي تستخدم مبادئ تختلف عن تلك المذكورة في هذه الوحدة.

مراجعة تراكمية

69. يُستخدم ليزر الهيليوم – نيون (λ = 633 nm) لإضاءة شق طولي عرضه غير معروف، فتظهر صورة على الشاشة تقع خلف الشق بمسافة 0.95 m. فإذا كان أول خط مظلم يقع على بعد 8.5 mm من مركز الخط المضيء الموجود في الوسط. فكم يبلغ عرض الشق؟

70. إذا كانت القوة بين كرتين فلزيتين متطابقتين شحنتيهما كما هو واضح في **الشكل 20** هي F. وإذا تلامست الكرتان ثم عادتا إلى مواقعهما الأصلية. فكم تبلغ القوة الجديدة بينهما؟



الشكل 20

71. كم تبلغ شدة المجال الكهربائي بين لوحين متوازيين موضوعين على مسافة 1.2 cm إذا تم تطبيق فرق جهد مقداره 45 V عليهما؟

72. احسب التكلفة اليومية لتشغيل مكبس هوائي يستغرق ربع الوقت ويسحب تيار كهربائي يساوي 12.0 A من دائرة كهربائية جهدها 245 V إذا كانت التكلفة تساوي 0.0950 AED لكل kWh.

73. سلك طوله 440 cm يحمل تيارًا كهربائي يساوي 7.7 A في اتجاه متعامد على مجال مغناطيسي. والقوة المبذولة على السلك 0.55 N. فما شدة المجال المغناطيسي؟

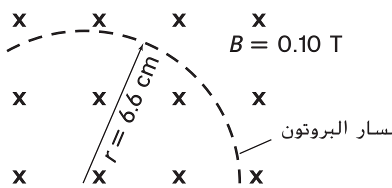
74. سلك يمتد بين الشمال والجنوب يتحرك في اتجاه الشرق عبر مجال مغناطيسي يشير لأسفل. فما اتجاه التيار؟

تدريب على الاختبار المعياري

الاختيار من متعدد

1. بالنسبة لجسيم مشحون يتحرك في مسار دائري،
   - A. فإن القوة المغناطيسية تكون موازية للسرعة ومتجهة نحو مركز المسار الدائري.
   - B. فإن القوة المغناطيسية قد تكون متعامدة على السرعة ومتجهة بعيدًا عن مركز المسار الدائري.
   - C. فإن القوة المغناطيسية تظل دائمًا موازية للسرعة ومتجهة بعيدًا عن مركز المسار الدائري.
   - D. فإن القوة المغناطيسية تظل دائمًا متعامدة على السرعة ومتجهة نحو مركز المسار الدائري.

2. إذا كان نصف قطر المسار الدائري الذي يأخذه بروتون في مجال مغناطيسي ثابت شدته 0.10 T يساوي 6.6 cm. فما هي سرعة البروتون؟
   - A. 6.3×10^{5} m/s
   - B. 2.0×10^{6} m/s
   - C. 6.3×10^{7} m/s
   - D. 2.0×10^{12} m/s

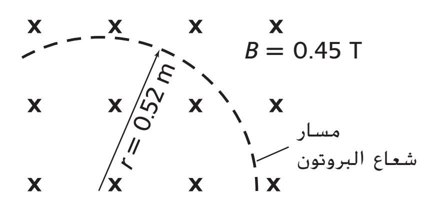


3. ثابت العزل الكهربائي لأحجار الميكا يساوي 5.4. فما هي سرعة الضوء أثناء مروره عبر الميكا؟
   - A. 3.2×10^{3} m/s
   - B. 9.4×10^{4} m/s
   - C. 5.6×10^{7} m/s
   - D. 1.3×10^{8} m/s

4. إذا كانت محطة بث إذاعي معينة تستخدم موجات طولها 2.87 m. فما هو تردد تلك الموجات؟
   - A. 9.57×10^{-9} Hz
   - B. 3.48×10^{-1} Hz
   - C. 1.04×10^{8} Hz
   - D. 3.00×10^{8} Hz

5. أي من الحالات التالية لا تؤدي لإنشاء موجة كهرومغناطيسية؟
   - A. فرق جهد ثابت يُطبق على بلورة كوارتز.
   - B. تيار متناوب يمر بسلك موجود داخل أنبوب بلاستيكي.
   - C. فرق جهد متناوب رنان يُطبق على دائرة ملف ومكثف.
   - D. إلكترونات ذات طاقة عالية تصطدم بهدف معدني في أنبوب أشعة إكس.

6. إذا كان نصف قطر المسار الدائري لحزمة بروتونات يساوي 0.52 m عندما تتحرك بشكل متعامد على مجال مغناطيسي شدته 0.45 T. وإذا كانت كتلة البروتون الواحد تساوي 1.67×10^{-27} kg. فما هي سرعة البروتونات الموجودة في تلك الحزمة؟
   - A. 1.2 m/s
   - B. 4.7×10^{3} m/s
   - C. 2.2×10^{7} m/s
   - D. 5.8×10^{8} m/s



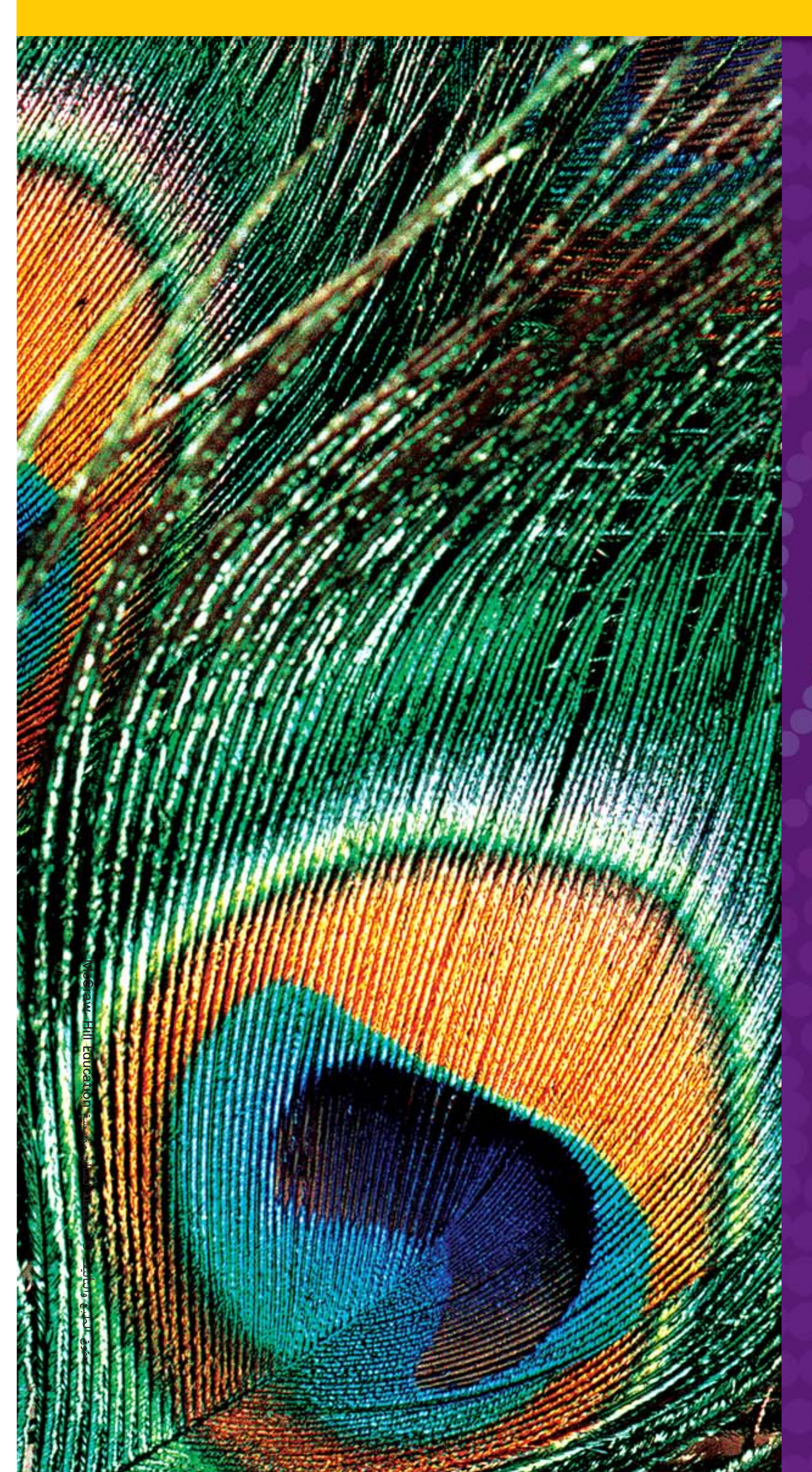
أسئلة ذات إجابات مفتوحة

7. إذا كانت كتلة الديوترون (نواة ذرة الديوتيريوم) تساوي 3.34×10^{-27} kg وشحنتها +e. وكانت سرعتها 2.88×10^{5} m/s وكانت تنتقل في مجال مغناطيسي شدته 0.150 T. فكم يبلغ نصف قطر انحناء مسارها؟

الوحدة 8

التداخل والحيود

الفكرة الرئيسة يمكن أن تحيد الموجات الضوئية كما يمكن أن تتداخل مع بعضها.

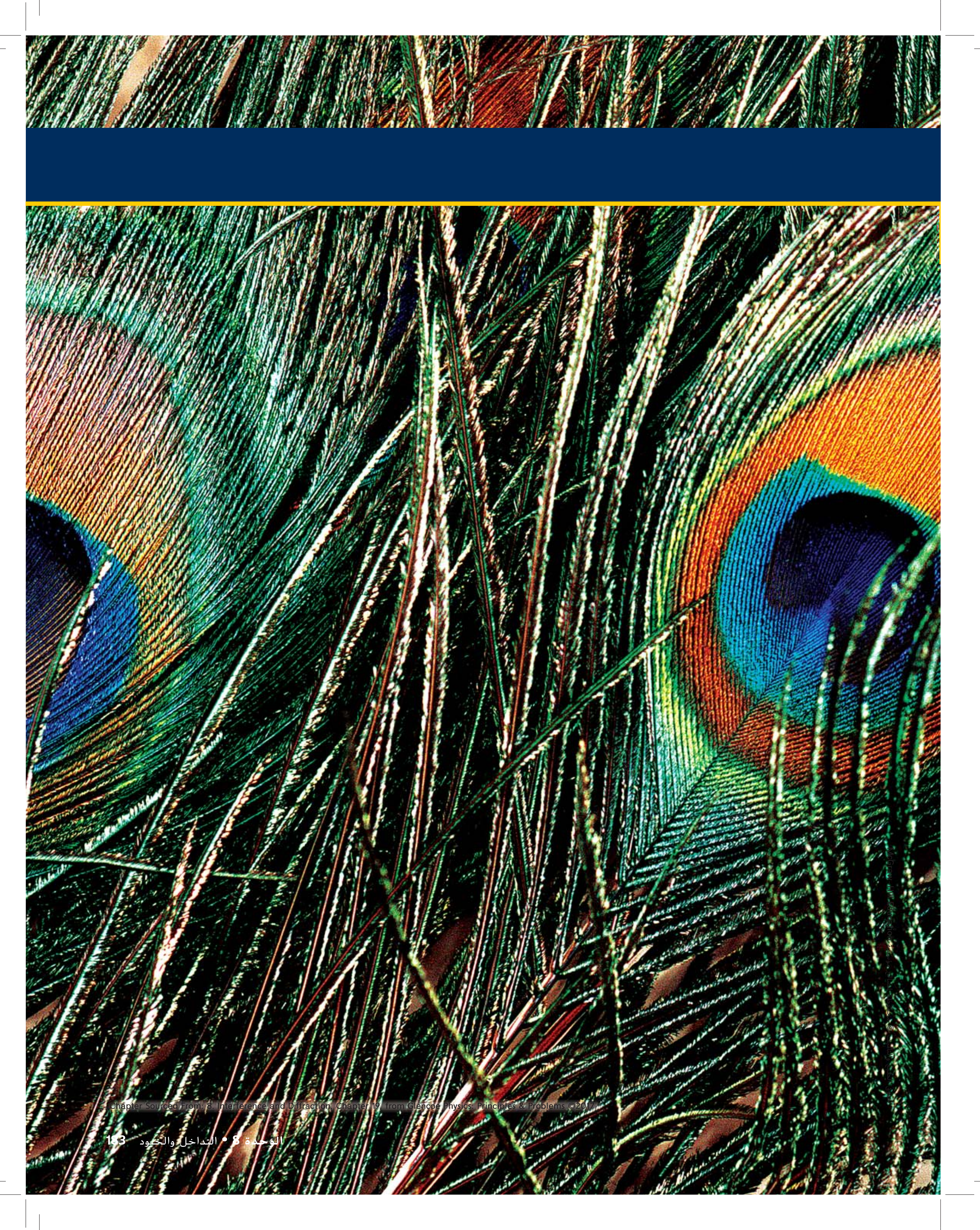


الأقسام

التجربة الاستهلالية

أنماط الضوء

ما أنماط الضوء التي تلاحظها على شاشة عند انعكاس أضواء مختلفة الألوان وضوء أبيض عن قرص مُدمج؟



Chapter Sourced From: 8. Interference and Diffraction, Chapter 19, from Glencoe Physics: Principles & Problems ©2017

القسم 1 التداخل



الفكرة الرئيسة

يمكن أن يتداخل الضوء عند مروره عبر شقوق ضيقة أو عندما ينعكس عن غشاء رقيق.

الأسئلة الرئيسة

- كيف يُنتج الضوء الساقط على شقَّين نمط تداخل؟
- كيف يمكنك استخدام نمط تداخل لحساب الطول الموجي للضوء؟
- كيف يمكن تطبيق تقنيات النمذجة على التداخل في الأغشية الرقيقة؟

مراجعة المفردات

التداخل interference: ينتج التداخل من تراكب موجتين أو أكثر

مفردات جديدة

ضوء غير مترابط incoherent light
ضوء مترابط coherent light
أهداب التداخل interference fringes
ضوء أحادي اللون monochromatic light
تداخل في الأغشية الرقيقة thin-film interference

الفيزياء في حياتك

هل رأيت من قبل ألوان قوس المطر التي كوّنتها فقاعات الصابون أو في ماء يحتوي على الصابون؟ يكون هذا نتيجة ظاهرة تُسمى التداخل في الأغشية الرقيقة. فكيف يتفاعل الضوء مع المادة لإنتاج هذه الأنماط؟

الضوء المترابط والضوء غير المترابط

تعلمتَ أنّ للضوء خصائص موجية، حيث يحيد عندما يمر بحافة. وتعلّمتَ أيضًا عند دراسة المرايا والعدسات أنّه يمكن توضيح الانعكاس والانكسار بناءً على النموذج الموجي للضوء. فما الذي دفع العلماء إلى الاعتقاد بأنّ للضوء خصائص موجية؟ اكتشف العلماء أنّ الضوء يمكن أن يتداخل بسبب تراكب الموجات.

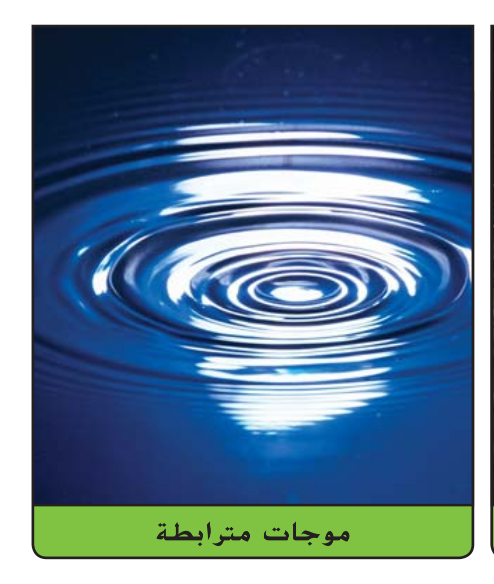
الضوء غير المترابط عندما تنظر إلى أجسام تُضاء بمصدر ضوء أبيض مثل مصباح قريب، ترى **ضوءًا غير مترابط**، وهو ضوء موجاته مختلفة في الطور. ويمكن مشاهدة تأثير عدم الترابط في الموجات عند سقوط مطر بغزارة على ماء راكد، حيث يصبح سطح الماء مائجًا ولا يظهر فيه النمط المنتظم للموجات، كما في **الشكل 1**. ونظرًا لأن تردد الموجات الضوئية كبير جدًا، فإنّ الضوء غير المترابط لا يظهر لك غير مترابط أي مائج ومتقطع؛ إلا أنّه عندما يُضاء جسم من مصدر ضوء أبيض غير مترابط، فإنك ترى تراكب موجات الضوء غير المترابط كأنها ضوء أبيض منتظم.

الضوء المترابط يُسمى الضوء الناتج عن تراكب موجات لها الطول الموجي نفسه وتكون متفقة في الطور **بالضوء المترابط**. ويمكن توليد مقدمة موجة منتظمة، التي تتكوّن من ضوء مترابط، من مصدر نقطي واحد، كما هو مبيّن في **الشكل 1**. كما يمكن أيضًا توليد موجة منتظمة من مصادر نقطية متعددة عندما تكون هذه المصادر النقطية كلها متفقة في الطور. وهذا النوع من الضوء المترابط يولّده الليزر.

الشكل 1 تمثل أنماط الموجات غير المنتظمة والمضطربة الضوء غير المترابط. وتمثّل أنماط الموجات المنتظمة الضوء المترابط.



موجات غير مترابطة



موجات مترابطة

تداخل الضوء المترابط

بين العامين 1801 و 1803، أجرى الفيزيائي الإنجليزي توماس يونج عددًا من التجارب التي أثبتت الخصائص الموجية للضوء. حيث وجّه يونج ضوءًا من مصدر صغير على شقين متقاربين وأنتج نمط تداخل.

اختار يونج جزءًا صغيرًا جدًا من ضوء أحد المصادر وجعله مترابطًا بتمريره عبر شق أحادي ضيق. ثم مرّر الضوء عبر شقين ضيقين وقريبين في حاجز، فسقط الضوء المتداخل الخارج من الشقين على شاشة. وأنتج هذا الضوء نمطًا من حزم مضيئة وأخرى معتمة سمّاها **أهداب التداخل**. فسّر يونج أنّ هذه الحزم نتجت عن التداخل البنّاء والتداخل الهدّام للموجات الضوئية الصادرة من الشقين في الحاجز.

استخدم يونج في تجربته **ضوءًا أحاديّ اللون**، وهو ضوء له طول موجي واحد. وفي هذه التجربة يُنتج التداخل البنّاء حزمة مركزية مضيئة بلون معيّن على الشاشة، كما يُنتج على كل جانب حزمًا مضيئة أخرى تفصلها فراغات متساوية وعرضها متساوٍ تقريبًا، كما هو مبيّن في **الشكل 3**. تتناقص شدة إضاءة الحزم كلما ابتعدنا عن الحزمة المركزية كما ترى. وتوجد بين الحزم المضيئة مناطق معتمة بسبب حدوث تداخل هدّام. تعتمد مواقع حزم التداخل البنّاء والتداخل الهدّام على الطول الموجي للضوء.

لكن عندما يُستخدم ضوء أبيض في تجربة الشق المزدوج، يؤدي التداخل إلى ظهور أطياف ملونة، كما هو مبيّن على الجزء الأيسر من **الشكل 3**. تتداخل الحزم المختلفة لألوان الطيف المرئي على الشاشة، حيث تتداخل كل هذه الألوان تداخلًا بنّاءً في الحزمة المركزية لذا تظهر بيضاء اللون. ونظرًا إلى أنّ مواقع الحزم المضيئة الأخرى الناتجة عن التداخل البنّاء تعتمد على الطول الموجي. تكون حزمة كل لون عند موقع مختلف، فينتج طيف من الألوان.

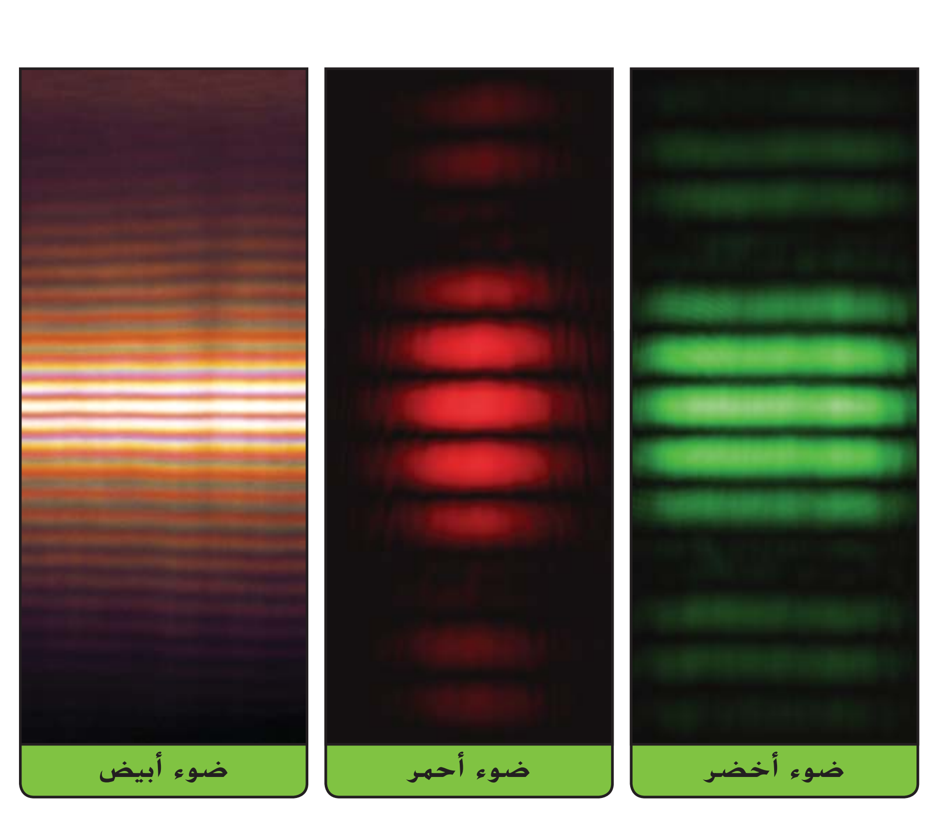


الشكل 2 تعود شهرة توماس يونج (1773–1829) إلى إسهاماته في العديد من المجالات المختلفة. فبالإضافة إلى دوره في تحديد الطبيعة الموجية للضوء، يشتهر بإسهامه في فك رموز اللغة الهيروغليفية المصرية.

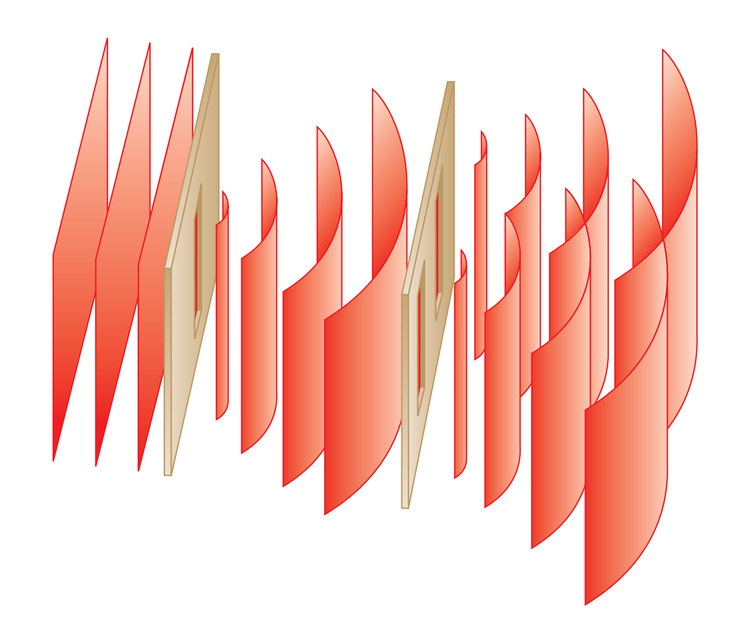
مختبر الفيزياء

الهولوغرامات

ما العلاقة بين تداخل الضوء المترابط والهولوغرامات؟



الشكل 3 تُنتج أنماط تداخل الشق المزدوج حزمة مركزية مضيئة ونمطًا من حزم مضيئة وأخرى معتمة على كلا الجانبين.

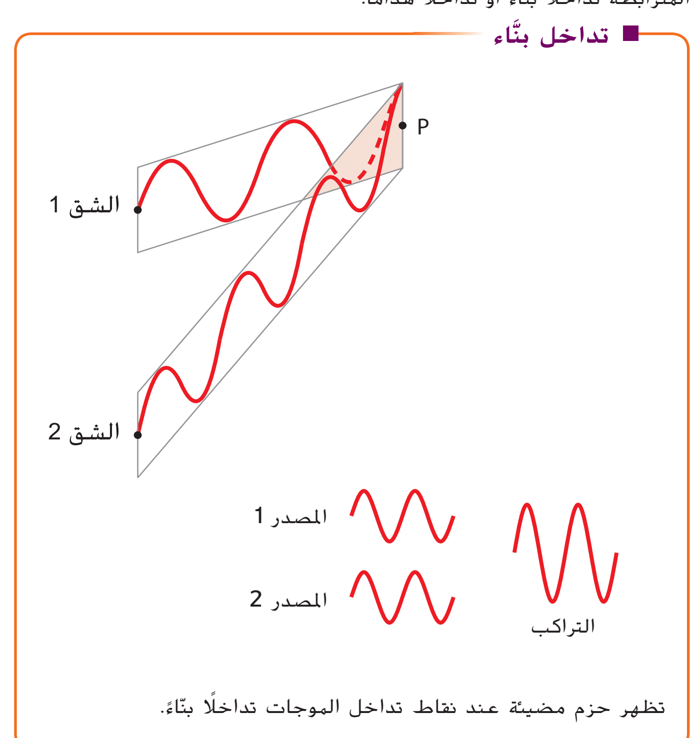


الشكل 4 تنتج مقدمات موجات أسطوانية الشكل تقريبًا عند مرور الضوء عبر الشقوق.

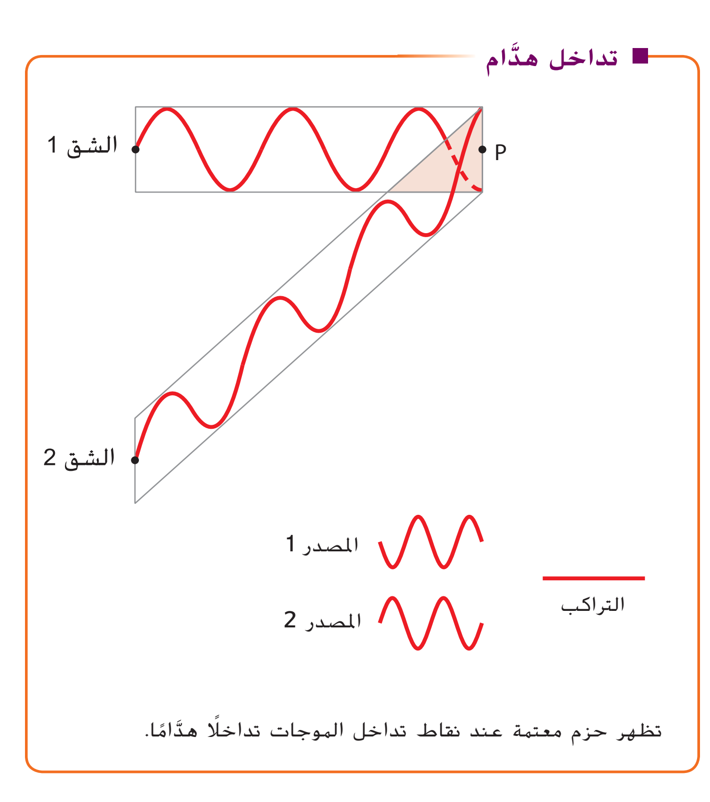
فكّر لماذا يتراوح عرض الشقوق بين عشرات ومئات أضعاف الأطوال الموجية للضوء.

توليد الضوء المترابط يُنتج الضوء الصادر من مصدر أحادي اللون ضوءًا غير مترابط. أما عند وضع حاجز ضوئي ذي شق ضيّق أمام ضوء أحادي اللون، ينتج ضوء مترابط. ونظرًا إلى أنّ عرض الشق صغير جدًا، لا ينفذ عبر الشق إلا الضوء الصادر من جزء صغير جدًا من المصدر. ثم يحيد هذا الجزء بواسطة الشق (وسيتم التطرق للحيود بشكل مفصل في القسم التالي)، فتنتج مقدمات موجات أسطوانية الشكل تقريبًا، كما هو مبيّن في **الشكل 4**. أما الحاجز الثاني، فله شقان ضيقان جدًا. ونظرًا إلى تماثل مقدمات الموجة الأسطوانية، فإن جزأيْ مقدمة الموجة يصلان إلى الحاجز الثاني متفقين في الطور. فينتج عن شقَّي الحاجز الثاني مقدمات موجات أسطوانية الشكل تقريبًا. ثم تتداخل مقدمات الموجات الناتجة عن هذين الشقين، كما هو مبيّن في **الشكل 4**. ويكون هذا التداخل بنّاءً أو هدّامًا اعتمادًا على العلاقة بين طوريهما، كما هو مبيّن في **الشكل 5**. إذا كان التداخل بنّاءً عند سقوط الضوء على حاجز، فستظهر حزمة مضيئة. أما إذا كان هدّامًا، فستظهر حزمة معتمة.

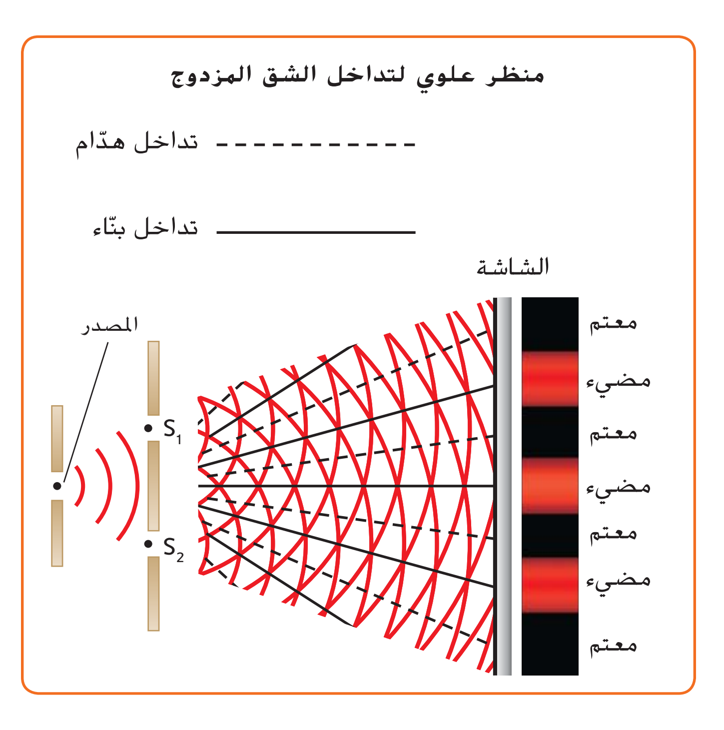
الشكل 5 **يمكن أن** تتداخل الموجات المترابطة تداخلًا بنّاءً أو تداخلًا هدّامًا.

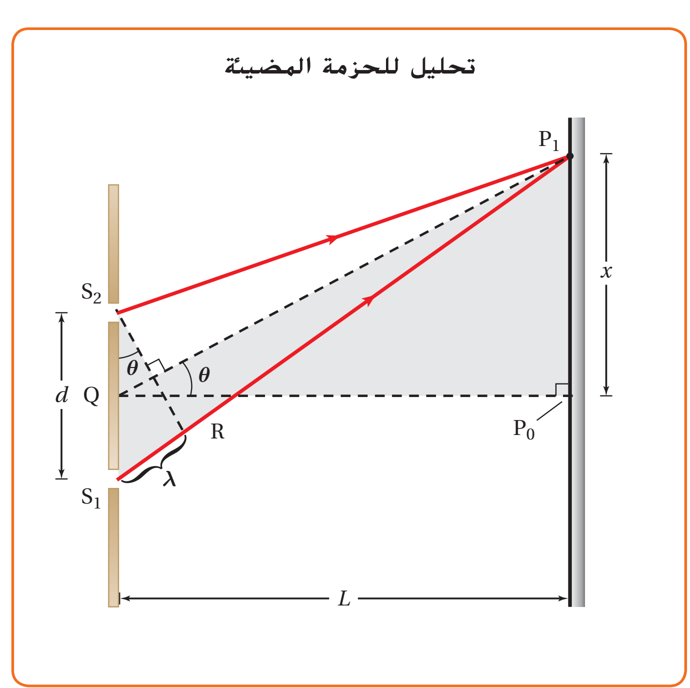


تظهر حزم مضيئة عند نقاط تداخل الموجات تداخلًا بنّاءً.



تظهر حزم معتمة عند نقاط تداخل الموجات تداخلًا هدّامًا.





قياس الطول الموجي للضوء يوضّح **الشكل 6** منظرًا علويًا لتجربة الشق المزدوج، حيث تتداخل مقدمات الموجات تداخلات بناءة وهدامة لتشكيل أنماط حزم مضيئة وأخرى معتمة. يوضّح الرسم التوضيحي في **الشكل 6** أنّ الضوء الذي يصل إلى النقطة P_0 يقطع المسافة نفسها من كل شق. ونظرًا إلى أنّ الموجات متفقة في الطور، تتداخل تداخلًا بنّاءً على الحاجز وتنتج الحزمة المركزية المضيئة عند النقطة P_0. كما يحدث تداخل بنّاء عند الحزمة المضيئة الأولى (P_1) على جانبي الحزمة المركزية، لأنّ القطعة المستقيمة P_1S_1 يزيد طولها بمقدار طول موجي واحد (λ) عن القطعة المستقيمة P_1S_2. لذا تصل الموجات عند المنطقة P_1 بالطور نفسه.

في الشكل أعلاه مثلثان مظللان. إنّ المثلث الكبير هو مثلث قائم الزاوية. لذا فإن $\tan\theta = x/L$. وفي المثلث الصغير RS_1S_2. يمثّل الضلع $\overline{S_1R}$ الفرق بين مساري الضوء، والذي يساوي طولًا موجيًا واحدًا. يوجد تبسيطان لحساب الطول الموجي.

1. إذا كان L أكبر بكثير من d، فإنّ القطعتين المستقيمتين S_1P_1 و S_2P_1 تكونان متوازيتين تقريبًا إحداهما مع الأخرى ومع القطعة المستقيمة QP_1، ويكون المثلث RS_1S_2 قائم الزاوية تقريبًا، لذا فإن $\sin\theta \approx \lambda/d$.
2. إذا كانت الزاوية θ صغيرة، فإنّ $\sin\theta$ يكون مساويًا تقريبًا لـ $\tan\theta$.

وباستخدام التبسيطين أعلاه، نجمع المعادلات $\tan\theta = x/L$ و $\sin\theta \approx \lambda/d$ و $\sin\theta \approx \tan\theta$ لنحصل على المعادلة $x/L = \lambda/d$. ولإيجاد الطول الموجي λ نستخدم المعادلة التالية.

الطول الموجي من تجربة الشق المزدوج

يساوي الطول الضوئي المقيس بتجربة الشق المزدوج المسافة بين الحزمة المركزية المضيئة والحزمة المضيئة الأولى على الشاشة، مضروبة في المسافة بين الشقين، ومقسومة على المسافة بين الشقين والشاشة.

$$\lambda = \frac{xd}{L}$$

يحدث تداخل بنّاء عند مواقع x_m على جانبَي الحزمة المركزية المضيئة، ويتم تحديد هذه المواقع من خلال المعادلة $m\lambda = x_m d/L$، حيث $m = 0, 1, 2$. وهكذا. وتتكوّن الحزمة المركزية المضيئة عند $m = 0$. وتُسمى الحزمة عند $m = 1$ بحزمة الرتبة الأولى غالبًا. وهكذا لبقية المواقع.

الشكل 6 يمكن استخدام تداخل الشق المزدوج لإيجاد الطول الموجي للضوء. ونظرًا إلى أنّ L أكبر بكثير من d، ولأنّ الزاوية θ صغيرة، تُبسَّط معادلة إيجاد الطول الموجي للضوء.

مختبر الفيزياء

ما الطول الموجي؟

ما العلاقة بين أنماط تداخل الشق المزدوج وكل من الحيود والطول الموجي؟

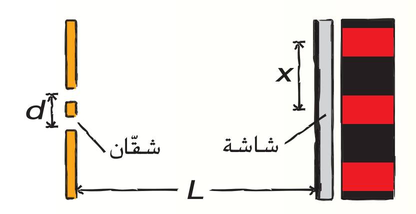
تداخل الشق المزدوج

كيف يمكن استخدام نمط تداخل من الشق المزدوج لقياس الطول الموجي للضوء؟

مثال 1

الطول الموجي للضوء أُجريت تجربة شق مزدوج لقياس الطول الموجي للضوء الأحمر. وكان البُعد بين الشقين 0.0190 mm. إذا كانت المسافة بين الشقين والشاشة 0.600 m، والمسافة بين الحزمة المضيئة ذات الرتبة الأولى والحزمة المركزية المضيئة 21.1 mm. فما الطول الموجي للضوء الأحمر؟

1 تحليل المسألة



- ارسم التجربة موضّحًا الشقين والشاشة.
- ارسم نمط التداخل موضّحًا الحزم المضيئة والمعتمة في مواقعها الصحيحة.

المعلوم	المجهول
$d = 1.90\times10^{-5}$ m	$\lambda = ?$
$x = 2.11\times10^{-2}$ m	
$L = 0.600$ m	

2 حساب المجهول

$$\lambda = \frac{xd}{L}$$

$$= \frac{(2.11\times10^{-2}\ \text{m})(1.90\times10^{-5}\ \text{m})}{(0.600\ \text{m})}$$

عوّض مستخدمًا $x = 2.11\times10^{-2}$ m, $d = 1.90\times10^{-5}$ m, $L = 0.600$ m.

$$= 6.68\times10^{-7}\ \text{m} = 668\ \text{nm}$$

3 تقييم الإجابة

- **هل الوحدات صحيحة؟** إنّ الإجابة بوحدة الطول، وهي وحدة صحيحة للطول الموجي.
- **هل الجواب منطقي؟** يساوي الطول الموجي للضوء الأحمر 700 nm تقريبًا، ويساوي الطول الموجي للضوء الأزرق 400 nm تقريبًا. لذلك، فإنّ الإجابة منطقية بالنسبة إلى الضوء الأحمر.

تطبيقات

1. سقط ضوء بنفسجي على شقين، المسافة الفاصلة بينهما 1.90×10^{-5} m. فظهرت الحزمة المضيئة ذات الرتبة الأولى على بُعد 13.2 mm من الحزمة المركزية المضيئة على شاشة تبعُد 0.600 m عن الشقَّين. ما مقدار الطول الموجي λ؟
2. سُلِّط ضوء برتقالي مُصفر من مصباح غاز الصوديوم بطول موجي 596 nm على شقين البُعد بينهما 1.90×10^{-5} m. ما المسافة بين الحزمة المركزية المضيئة والحزمة المضيئة باللون الأصفر ذات الرتبة الأولى إذا كانت الشاشة تبعُد مسافة 0.600 m عن الشقَّين؟
3. في تجربة شق مزدوج، استخدم طلاب الفيزياء أشعة ليزر طولها الموجي $\lambda = 632.8$ nm. ووضع أحد الطلاب الشاشةَ على بُعد 1.000 m من الشقين. فوجد أنّ المسافة بين الحزمة المضيئة ذات الرتبة الأولى والحزمة المركزية المضيئة هي 65.5 mm. ما المسافة الفاصلة بين الشقين؟
4. **تحفيز** مرّ ضوء برتقالي مُصفر طوله الموجي 596 nm عبر شقَّين المسافة الفاصلة بينهما 2.25×10^{-5} m فنتج نمط تداخل على الشاشة. إذا كانت المسافة بين الحزمة المركزية والحزمة المضيئة باللون الأصفر ذات الرتبة الأولى 2.00×10^{-2} m. فما بُعد الشاشة عن الشقين؟

نشر يونج النتائج التي توصل إليها العام 1803. إلا أنّه قوبِل بالمعارضة من معظم الفيزيائيين المؤيدين للنموذج الجسيمي للضوء لنيوتن؛ إلا أنّ نتائج يونج حظيت بالقبول بعد العام 1820 عندما اقترح جين فريسنل حلًا رياضيًا للطبيعة الموجية للضوء في إحدى المسابقات. بيّن سيمون دينس بويسون، أحد حكَّام المسابقة، أنه إذا كان اقتراح فريسنل صحيحًا، فستتكون بقعة مضيئة في مركز ظل جسم دائري مُضاء بضوء مترابط. إلا أنّ ذلك لم يحدث على الإطلاق. ثم أجرى جين آرجو، حكم آخر، التجربةَ فرأى هذه البقعة. وكان لهذا الفضل في إقناع بويسون وآرجو وكثيرين غيرهما بالطبيعة الموجية للضوء.

التداخل في الأغشية الرقيقة

هل سبق أن رأيت ألوان الطيف التي تكوّنها فقاعة من الصابون أو غشاء زيتي عائم على سطح تجمع مائي في موقف للسيارات كما في **الشكل 7**؟ لم تنتج هذه الألوان عن تحليل الضوء الأبيض بواسطة منشور أو عن الامتصاص بواسطة الصبغات، بل كانت نتيجة للتداخل البنَّاء والتداخل الهدَّام للموجات الضوئية المنعكسة عن أسطح منفصلة في غشاء رقيق. وتُسمى هذه الظاهرة **بالتداخل في الأغشية الرقيقة.**

إذا حُمل غشاء صابون رأسيًا، كما هو موضّح في **الشكل 8**، فإن وزنه يجعله أكبر سمكًا عند القاع منه عند القمة حيث يزداد السُمك تدريجيًا من أعلى إلى أسفل. عندما تسقط موجة ضوء على السطح الأمامي للغشاء، ينعكس جزء منها، كما يوضّح الشعاع 1. وينفذ جزء آخر منها. ويكون للموجات المنعكسة والنافذة التردد نفسه للموجة الأصلية. تنتقل الموجة النافذة عبر الغشاء إلى السطح الخلفي، حيث ينعكس جزء منها مرة أخرى، كما يوضّح الشعاع 2. وتستمر تجزئة الضوء باستمرار نفاذه عبر الغشاء. نظرًا إلى أنّ المجموعات المتماثلة من الموجات صادرة من مصدر واحد، تكون مترابطة.

تعزيز اللون كيف يُعزَّز انعكاس لون واحد؟ يحدث هذا عندما تكون الموجتان المنعكستان متفقتين في الطور بالنسبة إلى طول موجي معين. إذا كان سُمك غشاء الصابون في **الشكل 8** ربع الطول الموجي للضوء في الغشاء ($\lambda/4$)، فيساوي طول المسار ذهابًا وإيابًا داخل الغشاء $\lambda/2$. في هذه الحالة، قد تتوقع أنّ الشعاع 2 يعود إلى السطح الأمامي مختلفًا في الطور مع الشعاع 1 بنصف طول موجي، وأنّ كلًا من الموجتَين ستُلغي الأخرى وفقًا لمبدأ التراكب.

لكن عندما تنعكس موجة مستعرضة عن وسط سرعتُها فيه أقل، فإنها تنقلب. يحدث هذا للضوء عند حدّ وسطٍ معامل انكساره أكبر. نتيجةً لذلك، ينقلب الشعاع 1 أثناء انعكاسه؛ بينما ينعكس الشعاع 2 عن وسط معامل انكساره أقل (الهواء) بدون أن ينقلب. لذا يتفق الشعاعان 1 و 2 في الطور.

إذا حقق سُمكُ الغشاء (d) الشرطَ $d = \lambda/4$. فسينعكس لون الضوء الذي له هذا الطول الموجي بدرجة كبيرة. لاحظ أنّه نتيجة لقصر الطول الموجي للضوء في الغشاء عنه في الهواء، فإنّ $d = \lambda_{\text{الغشاء}}/4$. أو بدلالة الطول الموجي في الهواء $d = \lambda_{\text{الهواء}}/4n_{\text{الغشاء}}$. وتعزز الموجتان إحداهما الأخرى عند مغادرتهما للغشاء، بينما يحدث تداخل هدَّام للضوء ذي الأطوال الموجية الأخرى.

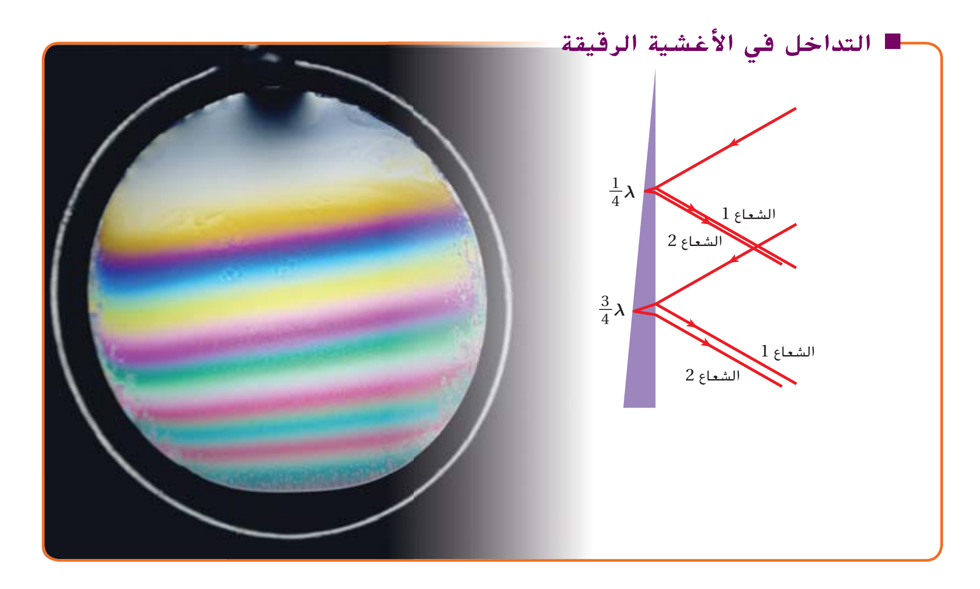


الشكل 7 تكون دوامة الألوان الظاهرة في غشاء زيتي ناتجة عن تداخل في الأغشية الرقيقة.

تجربة مصغرة

غشاء الصابون

كيف يبدو التداخل في الأغشية الرقيقة الناتج عن غشاء الصابون؟



الشكل 8 عندما تكون درجات سُمك غشاء الصابون $\lambda/4$ و $3\lambda/4$ و $5\lambda/4$ وما إلى ذلك، يكون الضوء الذي طوله الموجي λ متفقًا في الطور. وتكون حزم هذا الضوء الملوَّن مرئية عند درجات السُمك هذه.



الفيزياء في حياتك

عدسات النظارات غير العاكسة يمكن وضع غشاء رقيق على عدسات النظارات ليمنع عكس الأطوال الموجية للضوء التي تكون حساسية عين الإنسان لها عالية جدًا مما يقلل من وهج الضوء المنعكس ويسمح بنفاذ قدر أكبر من الضوء.

كما تعلم، لألوان الضوء المختلفة أطوال موجية مختلفة. أما الغشاء المتغير السُمك، فإنّ شرط الطول الموجي سيتحقق عند درجات سُمك مختلفة للألوان المختلفة حيث تنتج ألوان قوس قزح. وعندما يكون الغشاء رقيقًا للغاية بحيث لا يُنتج تداخلًا بنّاءً لأي طول موجي من ألوان الضوء المرئي، يبدو الغشاء معتمًا. لاحظ في الشكل 8 تكرار نمط الألوان الظاهرة على الغشاء. عندما يكون سُمك الغشاء $3\lambda/4$ ، تكون المسافة ذهابًا وإيابًا وسيحدث تداخل بنّاء للضوء الذي طوله الموجي λ مرة أخرى. وسيحقق أي سمك للغشاء مساويًا J $1\lambda/4$ و $3\lambda/4$ و $5\lambda/4$ وما إلى ذلك شرط التداخل البنّاء لطول موجي معين.

تطبيقات التداخل في الأغشية الرقيقة يتضمن مثال غشاء الماء المحتوي على الصابون في الهواء تداخلًا بنّاءً مع انقلاب إحدى الموجتين عند الانعكاس. ففي مثال محلول الفقاعات أو الغشاء الزيتي الرقيق العائم على تجمع مائي، كلما تغيّر سُمك الغشاء أو تغيّرت الزاوية التي يصنعها الضوء مع الغشاء، يتغيّر الطول الموجي الذي يحدث له تداخل بنّاء. يؤدي هذا إلى لون مُزاح على سطح الغشاء عندما يُضاء بضوء أبيض.

وفي الأمثلة الأخرى للتداخل في الأغشية الرقيقة، يمكن أن تنقلب كلتا الموجتين أو لا تنقلب أي منهما، حيث يعتمد انقلاب الموجة على معاملات انكسار الأوساط التي تنفذ من خلالها. وإذا انتقلت كلتا الموجتين من وسط ذي معامل انكسار أقل إلى وسط ذي معامل انكسار أكبر، فستنقلب كلتاهما. في هذه الحالة، ستكون درجات سُمك الغشاء التي تحقق شرط حدوث التداخل البنّاء $1\lambda/2$ و λ و $3\lambda/2$ و 2λ و $5\lambda/2$ وما إلى ذلك. يمكنك أن تحل المسألة التي تتضمن تداخل الغشاء الرقيق باستخدام الاستراتيجية التالية.

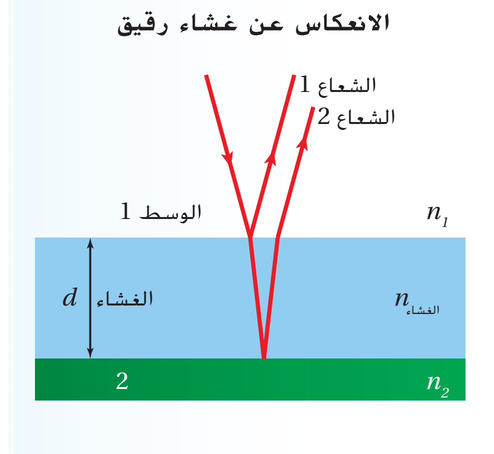
استراتيجيات حل المسائل

التداخل في الأغشية الرقيقة

عند حل المسائل المتعلقة بالتداخل في الأغشية الرقيقة، كوّن المعادلة الخاصة بالمسألة باستخدام الاستراتيجيات التالية.

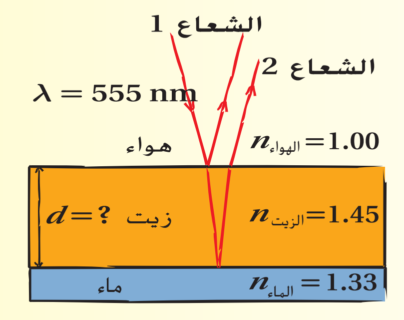
1. ارسم رسمًا للغشاء الرقيق وللموجتين المترابطتين. وللتبسيط، ارسم الموجات على شكل أشعة.
2. اقرأ المسألة. هل زاد سطوع الضوء المنعكس لهذا الطول الموجي أم انخفض؟ إذا زاد سطوعه، تكون الموجات المنعكسة قد تداخلت تداخلًا بنّاءً. أما إذا انخفض، فتكون الموجات قد تداخلت تداخلًا هدّامًا.
3. هل انقلبت إحدى الموجتين أو كلتاهما عند الانعكاس؟ إذا تغيّر معامل الانكسار من قيمة أقل إلى قيمة أكبر، فستكون الموجة منقلبة. أما إذا تغيّر المعامل من قيمة أكبر إلى قيمة أقل، فلن يحدث انقلاب.
4. أوجد قيمة المسافة الإضافية التي يجب أن تقطعها الموجة الثانية في الغشاء الرقيق لتوليد التداخل المطلوب.
   a. إذا أردتَ تداخلًا بنّاءً وكانت إحدى الموجتين مقلوبة، أو أردتَ تداخلًا هدّامًا وكانت كلتاهما مقلوبة أو كلتاهما غير مقلوبة، فإنّ الفرق في المسافة يكون عددًا فرديًا من أنصاف الأطوال الموجية: $(m + 1/2)\lambda_{\text{الغشاء}}$، حيث $m = 0, 1, 2$ وهكذا.
   b. إذا أردتَ تداخلًا بنّاءً وكانت كلتا الموجتين مقلوبة أو غير مقلوبة، أو أردتَ تداخلًا هدّامًا وكانت إحدى الموجتين مقلوبة، فإنّ الفرق في المسافة يكون عددًا صحيحًا من الأطوال الموجية: $m\lambda_{\text{الغشاء}}$، حيث $m = 1, 2$ وهكذا.
5. حدِّد المسافة الإضافية التي يقطعها الشعاع الثاني بحيث تساوي ضعف سُمك الغشاء $2d$.
6. تذكَّر مما درستَه سابقًا أنّ: $\lambda_{\text{الغشاء}} = \lambda_{\text{الفراغ}}/n_{\text{الغشاء}}$.

الانعكاس عن غشاء رقيق



مثال 2

الزيت والماء لاحظتَ وجود حلقات ملونة على سطح بركة ماء واستنتجت أنه لا بدّ من وجود طبقة رقيقة من الزيت على سطح الماء. ونظرتَ مباشرة إلى الأسفل نحو البركة فرأيتَ منطقة صفراء مُخضرة (λ = 555 nm). إذا كان معامل انكسار الزيت 1.45، ومعامل انكسار الماء 1.33. فما أقل سُمك لطبقة الزيت يُسبب ظهور هذا اللون؟



1 تحليل المسألة ورسمها

- ارسم الغشاء الرقيق والطبقتين، الطبقة التي فوقه والطبقة التي تحته.
- ارسم الأشعة مبيّنًا الانعكاس عن سطح الغشاء العلوي وعن سطحه السفلي.

المعلوم	المجهول
$n_{الماء}$ = 1.33	d = ؟
$n_{الزيت}$ = 1.45	
λ = 555 nm	

2 حساب المجهول

لأنّ $n_{الهواء} < n_{الزيت}$. فستنقلب الموجة عند انعكاسها الأول.
ولأنّ $n_{الزيت} < n_{الماء}$. فلن يحدث انقلاب في الانعكاس الثاني. لذلك، يحدث انقلاب موجي واحد فقط.
يكون الطول الموجي في الزيت أقل منه في الهواء.

اتبع استراتيجية حل المسائل لكي تكوّن المعادلة.

$$2d = \left(m + \frac{1}{2}\right)\left(\frac{\lambda}{n_{الزيت}}\right)$$

لأننا نريد أقل سُمك، فإنّ $m = 0$.

$$d = \frac{\lambda}{4n_{الزيت}}$$

$$= \frac{555\ \text{nm}}{(4)(1.45)}$$ ◄ عوّض مستخدمًا $m = 0$.

$$= 95.7\ \text{nm}$$ ◄ عوّض مستخدمًا λ = 555 nm ، $n_{الزيت}$ = 1.45.

3 تقييم الإجابة

- **هل الوحدات صحيحة؟** إنّ الإجابة بوحدة nm، وهي صحيحة بالنسبة إلى السُمك.
- **هل الجواب منطقي؟** إنّ أقل سُمك يكون أقل من طول موجي واحد، والذي يمثّل ما يجب أن يكون.

تطبيقات

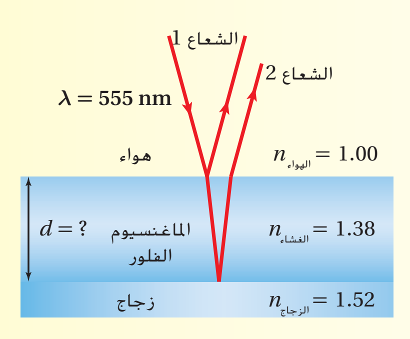
5. في مثال المسألة 2. ما أقل سُمك للغشاء لتكوين حزمة ضوء منعكسة لونها أحمر (λ = 635 nm)؟

6. وُضع غشاء من فلوريد المغنيسيوم على عدسة زجاجية مطلية بطبقة غير عاكسة. ما السُمك اللازم للغشاء غير العاكس لمنع انعكاس الضوء الأخضر المُصفر ذي الطول الموجي 555 nm؟ انظر إلى الرسم الموجود في **الشكل 9**.

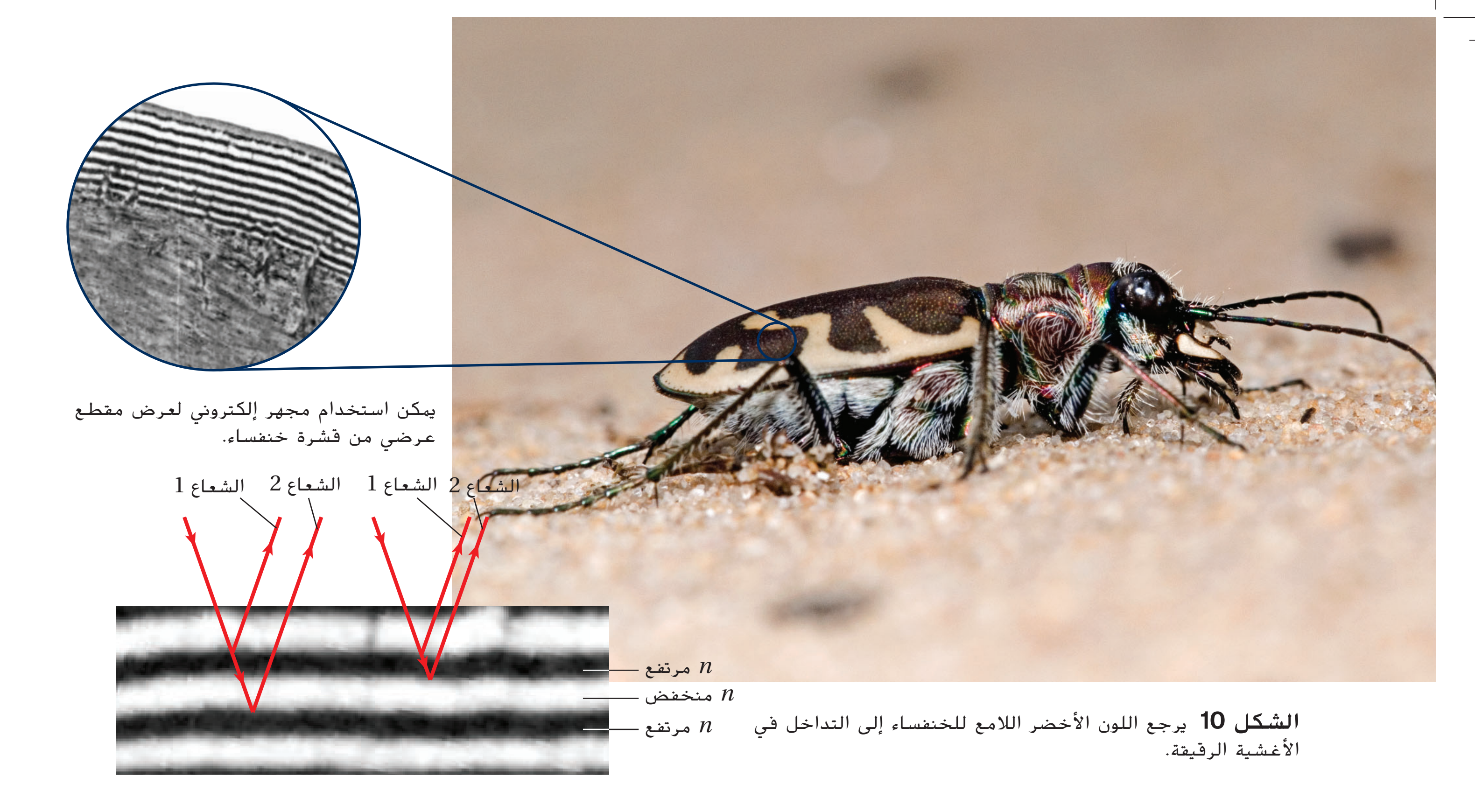
7. يمكنك ملاحظة التداخل في الأغشية الرقيقة عند غمس عصا فقاعة في محلول فقاعات ثم رفع العصا في الهواء. ما أقل سُمك لغشاء الصابون يمكن أن ترى عليه خيطًا أسود إذا كان الطول الموجي للضوء الساقط على الغشاء 521 nm؟ استخدم n = 1.33 لمحلول الفقاعات.

8. ما أقل سُمك لغشاء الصابون الذي معامل انكساره (n = 1.33) ليتداخل عنده ضوء طوله الموجي 521 nm تداخلًا بنّاءً مع نفسه؟

9. **مسألة تحفيزية** خلية شمسية من السليكون مطلية بطبقة غير عاكسة. إذا وُضع غشاء من أول أكسيد السليكون معامل انكساره n = 1.45 على السليكون الذي معامل انكساره n = 5.3. فما السُمك اللازم لهذه الطبقة لمنع انعكاس ضوء أخضر مُصفر طوله الموجي (λ = 555 nm)؟



الشكل 9



الشكل 10 يرجع اللون الأخضر اللامع للخنفساء إلى التداخل في الأغشية الرقيقة.

كما يحدث تداخل الضوء بشكل طبيعي في الطبقة الخارجية من قشرة العديد من الخنافس، كما هو موضّح في **الشكل 10**. يرجع اللون الأخضر المتلألئ للخنفساء إلى انعكاس عن الطبقات الرقيقة المتوازية من مادة الكايتين ومواد أخرى أحيانًا مختلفة في معامل الانكسار. وتوضّح صور المجهر الإلكتروني هذه الطبقات المتوازية. يوضّح الرسم التخطيطي في **الشكل 10** طريقة عمل هذه العاكسات متعددة الطبقات. تعكس الطبقات العديدة للهيكل الخارجي الضوءَ، فيحدث تداخل بنّاء للضوء الأخضر، ومن ثم ينتج هذا المظهر المتلألئ. كما يرجع تلألؤ العديد من الخنافس والفراشات الأخرى وكذا الحجر الكريم أوبال إلى تداخل الضوء.

القسم 1 مراجعة

.10 **الفكرة الرئيسة** قطعة كبيرة من الورق المقوى عليها شقان ضيقان جدًا وقريبان من بعضهما. وأُضيء هذان الشقان بضوء أحمر أحادي اللون. ووُضعت ورقة بيضاء بعيدًا عن الشقين، فنتج نمط من الحزم المضيئة والمعتمة على الورقة. صف سلوك الموجة عندما تسقط على الشق، واشرح سبب ظهور بعض المناطق مضيئة وبعضها معتمة.

.11 **أنماط التداخل** ارسم النمط الموضّح في المسألة السابقة.

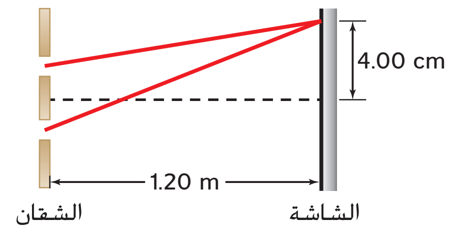
.12 **أنماط التداخل** ارسم ما يحدث للنمط الذي وُصف في المسألتين السابقتين عند استخدام ضوء أزرق بدلًا من الضوء الأحمر.

.13 ينفخ أشرف في لعبة فقاعات، ويمسك بعصا الفقاعة المحتوية على غشاء من الصابون معامل انكساره ($n = 1.33$) بحيث يكون هذا الغشاء معلقًا بشكل رأسي.

.a ما العرض الثاني الأقل سمكًا لغشاء الصابون بحيث يرى أشرف خطًا مضيئًا إذا كان الطول الموجي للضوء الساقط على الغشاء 575 nm؟

.b ما درجات العرض الأخرى التي تنتج خطًا مضيئًا عندما يكون الطول الموجي للضوء الساقط على الغشاء 575 nm؟

.14 سقط ضوء طوله الموجي 542 nm على شق مزدوج. استخدم القيم الموجودة في **الشكل 11** لإيجاد المسافة الفاصلة بين الشقين.



الشكل 11

.15 **التفكير الناقد** تستخدم معادلة الطول الموجي المشتقة من تجربة الشق المزدوج تبسيطًا، وهو أنه عندما تكون θ صغيرة يكون $\sin \theta \approx \tan \theta$. إلى أي زاوية يكون هذا التقريب جيدًا عندما تحتوي البيانات على رقمين معنويين؟ وهل ستزداد الزاوية العُظمى للتقريب الصحيح أم ستتناقص عندما تزيد دقة قياسك لها؟



القسم 2

الحيود

الفكرة الرئيسة

تحيد الموجات الضوئية عندما تمرّ عبر شق أحادي، وتحيد وتتداخل عندما تسقط على محزوز حيود.

الأسئلة الرئيسة

- ما الذي يؤثر في عرض الحزمة المركزية المضيئة في نمط حيود شق أحادي؟
- كيف تُكوّن محزوزات الحيود أنماط الحيود؟
- كيف تُستخدم محزوزات الحيود في مطياف ذي محزوز حيود؟
- كيف يحد الحيود من القدرة على التمييز بين جسمين متقاربين باستخدام عدسة؟

مراجعة المفردات

الحيود diffraction: انحناء الضوء حول حاجز

مفردات جديدة

نمط الحيود diffraction pattern

محزوز الحيود diffraction grating

معيار ريليه rayleigh criterion

الفيزياء في حياتك

تنتج الثقوب المجهرية الموجودة في الأقراص المدمجة وأقراص DVD طيفًا من الضوء المنعكس من خلال الحيود. ويمكن أن يستخدم العلماء معرفتهم بالحيود لإيجاد الأطوال الموجية للضوء ودراسة التركيبات الجزيئية مثل الحمض النووي DNA.

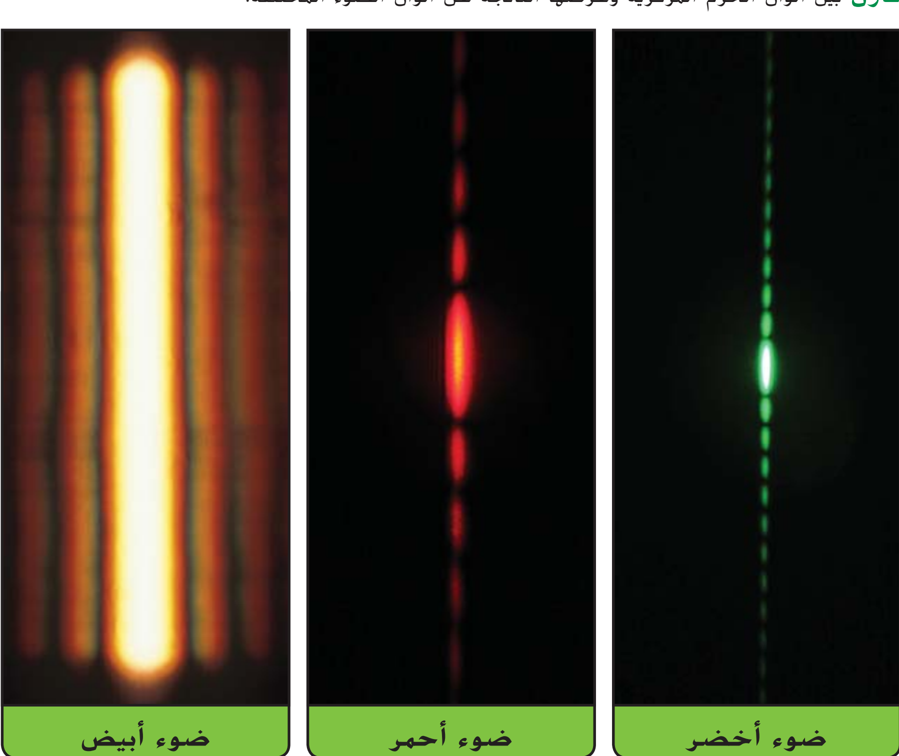
حيود الشق الأحادي

درستَ سابقًا أنّ مقدمات الموجات الضوئية تحيد عندما تمرّ حول الحافة. ويمكن شرح الحيود باستخدام مبدأ هويجنز الذي ينص على أنّ مقدمة الموجة تتكوّن من مويجات كثيرة تمثّل مصادر نقطية. عندما يمرّ الضوء عبر شق حافتاه متقاربتان جدًا، ينتج نمط على الشاشة. ينتج هذا النمط، الذي يسمى **نمط الحيود**، عن التداخل البنّاء والهدّام لمويجات هويجنز.

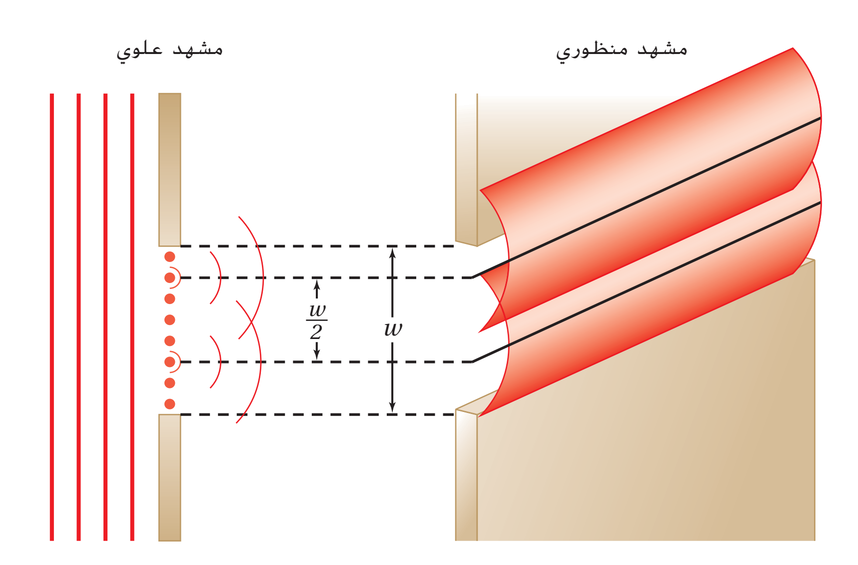
عندما يمرّ الضوء الأخضر المترابط عبر فتحة واحدة صغيرة عرضها يساوي 10 إلى 100 ضعف الطول الموجي للضوء تقريبًا، فإنّ الضوء يحيد عند كلتا الحافتين وتظهر مجموعة من الحزم المضيئة والمعتمة على شاشة بعيدة، كما في **الشكل 12**. وبدلًا من تكوّن حزم تفصلها مسافات متساوية تقريبًا كما في حالة استخدام مصدرين مترابطين في تجربة الشق المزدوج ليونج، يظهر في هذا النمط حزمة مركزية مضيئة وعريضة مع حزم أقل عرضًا وأقل إضاءة على كلا الجانبين. أما عند استخدام الضوء الأحمر بدلًا من الأخضر، فيزداد عرض الحزمة المركزية المضيئة. وعند استخدام الضوء الأبيض، يكون النمط مزيجًا من أنماط ألوان الطيف كلها.

الشكل 12 تنتج عن حيود الشق الأحادي حزمة مركزية واحدة مضيئة وعريضة وحزم أقل عرضًا وأقل إضاءة على كلا الجانبين.

قارن بين ألوان الحزم المركزية وعرضها الناتجة عن ألوان الضوء المختلفة.



الشكل 13 لتوضيح أنماط الحيود من خلال مويجات هويجنز، يتم اختيار نقطتين بحيث تكون المسافة بينهما $\frac{w}{2}$.



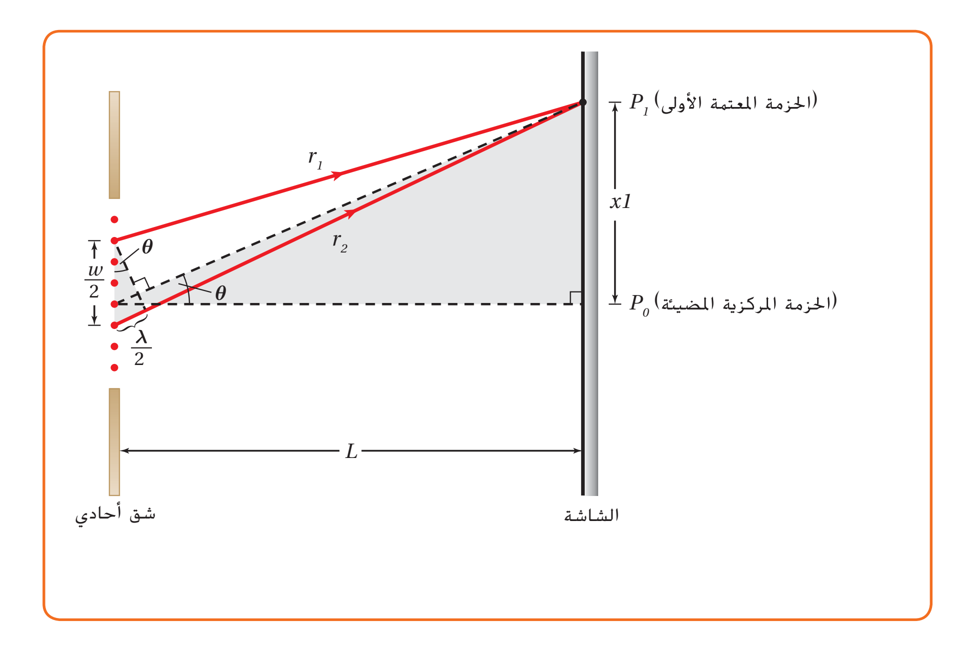
مويجات هويجنز لملاحظة طريقة إنتاج مويجات هويجينز نمط الحيود، تخيّل شقًا عرضه w مجزّأً إلى عدد زوجي من نقاط هويجنز، كما هو موضّح في **الشكل 13**، حيث تعمل كل نقطة كمصدر لمويجات هويجنز. جزّئ الشق إلى جزأين متساويين، واختر مصدرًا واحدًا من كل جزء، بحيث يبعد كل جزء عن الآخر مسافة $w/2$. سيُنتج هذا الزوج من المصادر الموجات الأسطوانية المترابطة التي ستتداخل.

سيقابل أيَ موجة هويجنز تتكوّن في النصف العلوي مويجةٌ أخرى تتكوّن في النصف السفلي، وتفصلهما مسافة $w/2$، مما يؤدي إلى تداخلهما تداخلًا هدّامًا وتكوين حزمة معتمة على الشاشة. تتداخل كل الأزواج المماثلة من مويجات هويجنز تداخلًا هدّامًا عند الحزم المعتمة. والعكس صحيح، تكون الحزمة المضيئة على الشاشة نتيجة تداخل أزواج من مويجات هويجنز تداخلًا بنّاءً. أما في المناطق ذات الإضاءة الخافتة بين الحزم المضيئة والمعتمة، فيحدث تداخل هدّام بشكل جزئي.

☑ **التأكد من فهم النص** **حدِّد** نوع تداخل مويجات هويجنز الذي يكوِّن حزمة معتمة على الشاشة.

نمط الحيود عندما يضاء الشق الأحادي، تظهر حزمة مركزية مضيئة عند الموقع P_0 على الشاشة، كما في **الشكل 14**. وتظهر الحزمة المعتمة الأولى عند الموقع P_1، لأنه عند هذا الموقع يختلف طولا مسار r_1 و r_2 لمويجتَي هويجنز أحدهما عن الآخر بمقدار نصف طول موجي، مما ينتج تداخلًا هدّامًا. يشبه هذا النموذجُ نموذجَ تداخل الشق المزدوج رياضيًا. إنّ مقارنة نمط حيود الشق الأحادي بنمط تداخل الشق المزدوج باستخدام شقوق لها العرض نفسه تُظهر أنّ نمط حيود الشق الأحادي بأكمله متطابق مع حزم التداخل المضيئة والمعتمة الأقل عرضًا، حيث تنتج أنماط الشق المزدوج عن تداخل الضوء من كل شق أحادي.

سنطوّر الآن معادلة لنمط الحيود الناتج عن الشق الأحادي. سنستخدم التبسيطات نفسها التي استُخدمت في تداخل الشق المزدوج، مع افتراض أنّ البُعد عن الشاشة أكبر بكثير من w. كما هو موضّح أعلاه، والمسافة الفاصلة بين مصدري الموجتين المتداخلتين $w/2$. ولإيجاد المسافة التي تم قياسها على الشاشة للحزمة المعتمة الأولى (x_1)، نلاحظ أنّ فرق طول المسار يساوي $\lambda/2$ بسبب حدوث تداخل هدّام عند الحزمة المعتمة. لذا فإنّ $x_1/L = \lambda/w$.



الشكل 14 يرتبط عرض الحزمة المضيئة في حيود الشق الأحادي بطول موجة الضوء والمسافة من الشق إلى الشاشة وعرض الشق.

بدلًا من قياس المسافة إلى الحزمة المعتمة الأولى من مركز الحزمة المركزية المضيئة (x_1)، يُفضل قياس عرض الحزمة المركزية المضيئة ($2x_1$)، كما في المعادلة التالية.

عرض الحزمة المضيئة في حيود الشق الأحادي

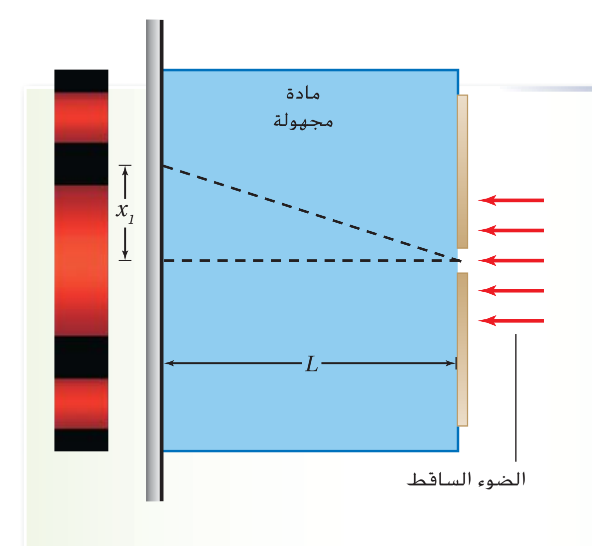
يساوي عرض الحزمة المركزية المضيئة حاصل ضرب ضعف الطول الموجي في البُعد عن الشاشة مقسومًا على عرض الشق.

$$2x_1 = \frac{2\lambda L}{w}$$

يقدّم حيود الشق الأحادي تصورًا واضحًا للطبيعة الموجية للضوء عندما يتراوح عرض الشقوق بين 10 و 100 ضعف الطول الموجي للضوء، بينما تكوّن الفتحات الأكبر من ذلك ظلالًا حادة. وكان إسحق نيوتن أول من لاحظ ذلك. رغم أنّ نمط الشق الأحادي يعتمد على الطول الموجي للضوء، إلا أنّه لا يكون فعالًا في قياس الطول الموجي. ويوفر استخدام عدد كبير من الشقوق بعضها بجانب بعض أداة أكثر فاعلية لقياس الطول الموجي.

☑ **التأكد من فهم النص** **صف** الافتراض الذي وُضع لـ w و L لمعادلة حيود الشق الأحادي.

تحدي الفيزياء



لديك مجموعة من المواد غير المعروفة وأردتَ أن تعرف نوع كل مادة باستخدام جهاز حيود الشق الأحادي. فقررتَ وضع عينة من المادة المجهولة في المنطقة بين الشق والشاشة واستخدمتَ البيانات التي حصلتَ عليها لتحديد نوع كل مادة بحساب معامل انكسارها.

1. اكتب صيغة عامة لمعامل الانكِسار لمادة مجهولة بدلالة الطول الموجي للضوء ($\lambda_{\text{الفراغ}}$) وعرض الشق (w) والمسافة بين الشق والشاشة (L) والمسافة بين الحزمة المركزية المضيئة والحزمة المعتمة الأولى (x_1).
2. إذا كان الطول الموجي للمصدر الذي استخدمته 634 nm، وعرض الشق 0.10 mm، والمسافة بين الشق والشاشة 1.15 m، وغمرتَ الجهاز في الماء ($n_{\text{الماء}} = 1.33$)، فكم تتوقع أن يكون عرض الحزمة المركزية؟

تطبيقات

16. يسقط ضوء أخضر أحادي اللون طوله الموجي 546 nm على شق أحادي عرضه 0.095 mm. ويبعُد الشق مسافة 75 cm عن الشاشة. فكم يبلغ عرض الحزمة المركزية المضيئة؟

17. مرّ ضوء أصفر طوله الموجي 589 nm عبر شق عرضه 0.110 mm فنتج نمط على الشاشة. إذا كان عرض الحزمة المركزية المضيئة 2.60×10^{-2} m. فما بُعد الشقوق عن الشاشة؟

18. سقط ضوء من ليزر هيليوم – نيون ($\lambda = 632.8$ nm) على شق عرضه مجهول، وتكوّن نمط على شاشة تبعُد 1.15 m. وكان عرض الحزمة المركزية عليها 15.0 mm. فكم عرض الشق؟

19. سقط ضوء أصفر على شق أحادي عرضه 0.0295 mm. وكان عرض الحزمة المركزية المضيئة 24.0 mm على شاشة تبعُد 60.0 cm. فما الطول الموجي للضوء؟

20. **مسألة تحفيزية** سقط ضوء أبيض على شق أحادي عرضه 0.050 mm. ووُضعت شاشة على بُعد 1.00 m. ووَضع طالب مرشحًا أزرق بنفسجيًا ($\lambda = 441$ nm) على الشق أولًا، ثم وضع مرشحًا أحمر ($\lambda = 622$ nm). ثم قاس الطالب عرض الحزمة المركزية المضيئة.
    a. أي من المرشّحَين نتجت عنه حزمة أكثر عرضًا؟
    b. احسب عرض الحزمة المركزية المضيئة لكل من المرشّحَين.

تجربة مصغرة

محزوزات الحيود

ما تأثير الطول الموجي في أنماط الحيود الناتجة عن محزوز الحيود؟

محزوزات الحيود

تستخدم محزوزات الحيود غالبًا، كتلك المبيّنة في **الشكل 15**، لأخذ قياسات دقيقة للطول الموجي. إنّ **محزوز الحيود** هو أداة مكوّنة من شقوق كثيرة صغيرة تسبّب حيود الضوء وتكوّن نمطًا ناتجًا عن تداخل أنماط ناتجة عن حيود شق أحادي. يشبه هذا النمط نمط تداخل ناتجٍ عن شق مزدوج، لكن تكون حزمه أكثر إضاءة وأقل عرضًا. يمكن أن تتكوّن محزوزاتُ الحيود من 10,000 شق لكل سنتيمتر، وهذا يعني أنّ المسافة الفاصلة بين الشقوق تكون صغيرة جدًا تصل إلى 10^{-6} m. يُعدّ محزوز الحيود أداة فعالة لدراسة الضوء والأجسام التي تبعث الضوء أو تمتصه.

من أنواع محزوزات الحيود ما يُسمى محزوز النفاذ. ويُصنع محزوز النفاذ بعمل خدوش على زجاج مُنفذ للضوء في صورة خطوط رفيعة جدًا باستخدام رأس من الألماس، حيث تعمل الفراغات بين خطوط الخدوش كالشقوق.

يمكن استخدام محزوزات الحيود مع الألماس لتجمل مظهره، حيث تُحفَر المحزوزات على أسطح معينة للألماس لزيادة تشتّت الضوء ولتبدو الجواهر برّاقة أكثر.



الشكل 15 تُستخدم محزوزات الحيود في أجهزة وأدوات كثيرة. كما أنّ التأثيرات التي تنتجها هذه المحزوزات تجعلها مثالية لاستخدامها في صناعة المجوهرات.



الشكل 16 يُعدّ القرص المدمج محزوز انعكاس ينتج طيفًا ضوئيًا. وتوضّح الصورة المكبرة لسطح القرص المدمج ترتيب الثقوب والأرضيات.

تُنتِج محزوزات الحيود الهولوغرافية الطيفَ الأكثر إضاءة. وتُصنع باستخدام ليزر ومرايا لإنتاج نمط حيود يتكوّن من خطوط مضيئة ومعتمة متوازية. حيث يُعرض النمط على قطعة فلزية مطلية بمادة حساسة للضوء. فيُنتِج الضوء الصادر من الليزر تفاعلًا كيميائيًا يجعل المادة صلبة. ثم يوضع الفلز في حمض يتفاعل معه في الأماكن غير المحمية بالمادة الصلبة. وتكوّن النتيجة مجموعة من البروزات والنتوءات في الفلز مماثلة لنمط الحيود الأصلي. كما يمكن استخدام الفلز نفسه كمحزوز انعكاس. ففي بعض الحالات، توضع طبقة بلاستيكية على فلز بعد تسخينه، فتنتج بروزات ونتوءات في الطبقة البلاستيكية. وتكون أنماط الحيود مضيئة للغاية بسبب الشكل الجيبي للبروزات والنتوءات.

محزوز الانعكاس قد تلاحظ أنّ الضوء المنعكس عن الأقراص المدمجة أو أقراص DVD ينتج نمط حيود طيفي، كما في **الشكل 16**. يُوجد نوع من محزوزات الحيود يُسمى محزوز الانعكاس، ويُصنع بحفر خطوط رفيعة على أسطح طبقة فلزية أو زجاج عاكس. تُعتبَر الأقراص المدمجة وأقراص DVD أمثلة على محزوزات الانعكاس، حيث تُنتج طيف ألوان نراه عندما ينعكس الضوء الأبيض عن أسطحها. إذا سلّطتَ ضوءًا أحادي اللون على قرص DVD، فسيُكوِّن الضوء المنعكس نمط انعكاس على شاشة. تُنتج محزوزات النفاذ ومحزوزات الانعكاس أنماطًا متشابهة يُمكن تحليلها بالطريقة نفسها.

الأقراص المدمجة وأقراص DVD وأقراص الأشعة الزرقاء لماذا يُعتبَر القرص المدمج أو قرص DVD محزوز حيود؟ تُعتبَر الأقراص المدمجة وأقراص DVD محزوزات خطية تقليدية. وتُغطَى أسطحها فعليًا بخطوط من الفجوات المجهرية تُسمى ثقوبًا تفصل بينها مناطق مسطحة تُسمى أرضيات، وتأخذ شكلًا حلزونيًا، كما هو مبيّن في **الشكل 16**. تعمل منحنيات الشكل الحلزوني كمحزوز حيود، وتفصل الألوان من خلال التداخل. إنّ الأقراص المدمجة وأقراص DVD محزوزات حيود، لكن لا تمثّل هذه الحقيقة أهمية بالنسبة إلى وظيفتها، لكن المهم هو الطريقة التي تتفاعل بها مع الأطوال الموجية المختلفة للضوء.

تخزين المعلومات وقراءتها يُستخدم الليزر "لقراءة" نمط الثقوب والأرضيات على القرص المدمج أو قرص DVD. يشبه ذلك طريقة برايل التي يستخدمها شخص ضرير للقراءة. حيث ينعكس الضوء الصادر من الليزر عن سطح القرص إلى كاشف الضوء. يتم تسليط ضوء الليزر بحيث تسقط بقعته الساطعة على الكاشف عندما ينعكس عن الأرضيات. وعندما ينعكس عن الثقوب، ينتشر ويخفت ضوءه.

يتحدد حجم البقعة بالحيود، لذا، إذا استُخدم طول موجي قصير لليزر، فيقل حجم البقعة وتكون الثقوب أقرب بعضها إلى بعض، مما يسمح بتخزين المزيد من المعلومات. بفضل تقدم تكنولوجيا الليزر، تُستخدم ليزرات بطول موجي قصير، مما يسمح بوضع كم معلومات أكبر على القرص. فأقراص الموسيقى المدمجة تستخدم ضوء الأشعة تحت الحمراء بطول موجي 780 nm. يمكن أن يستوعب القرص المدمج معلومات بسعة 700 ميجابايت تقريبًا. وتستخدم أقراص DVD الليزر الأحمر (650 nm)، مما يسمح بتسجيل أكثر من 4 جيجابايت. أما أقراص الأشعة الزرقاء، فتستخدم الليزر البنفسجي (405 nm). ويظهر الليزر باللون الأزرق، ولذا سُمي القرص بهذا الاسم. يمكن أن تستوعب أقراص الأشعة الزرقاء ذات الطبقة الواحدة معلومات بسعة تصل إلى 25 جيجابايت.

التأكد من فهم النص **اشرح** العلاقة بين كم المعلومات التي يمكن تخزينها على قرص DVD والطول الموجي للضوء المستخدم لقراءة هذه المعلومات.

قياس الطول الموجي تُسمى الأداة التي تُستخدم لقياس الأطوال الموجية للضوء باستخدام محزوز الحيود منظارًا طيفيًا ذا محزوز. كما في الرسم التخطيطي في **الشكل 17**، حيث يبعث المصدر المراد تحليله ضوءًا يُوجَّه نحو شق ومنه إلى مُجمِّع أشعة ثم إلى محزوز الحيود. فيُنتج المحزوز نمط حيود يمكن مشاهدته بالتلسكوب.

إذا كان مصدر الضوء أحادي اللون، فسيكون نمط الحيود الناتج عن المحزوز عبارة عن خطوط مضيئة ضيقة تفصلها مسافات متساوية، كما هو موضّح في **الشكل 18**. كلما زاد عدد الشقوق لكل وحدة طول من المحزوز، كانت الخطوط أضيق في نمط الحيود. وكلما كانت الخطوط أضيق، زادت دقة قياس المسافة بين الخطوط المضيئة.

لقد درستَ سابقًا في هذه الوحدة أنه يمكن استخدام نمط الحيود الناتج عن الشق المزدوج في حساب الطول الموجي. ويمكن وضع معادلة محزوز الحيود بالطريقة نفسها التي اتُبعت لتطوير معادلة الشق المزدوج. لكن الزاوية θ في محزوز الحيود يمكن أن تكون كبيرة، لذا لا يُطبَّق التبسيط الخاص بالزاوية الصغيرة. ويمكن إيجاد الطول الموجي بقياس الزاوية (θ) بين الخط المركزي المضيء والخط المضيء ذي الرتبة الأولى.

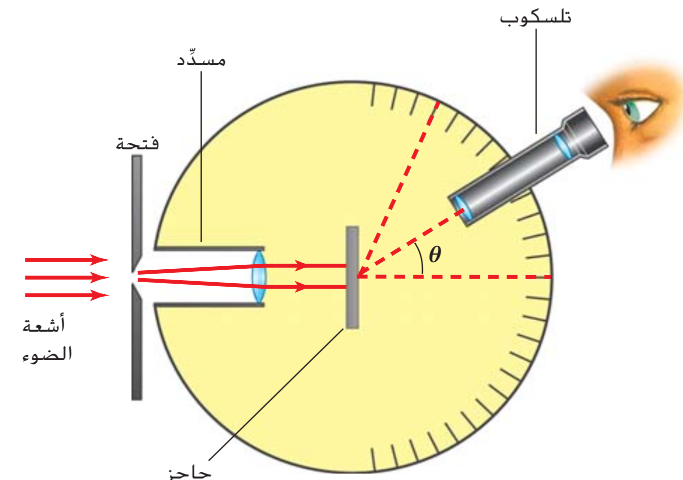
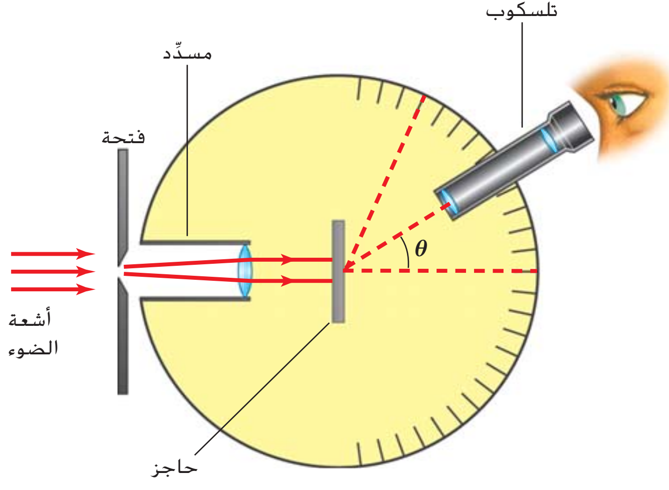
الطول الموجي من محزوز الحيود

يساوي الطول الموجي للضوء المسافة الفاصلة بين الشقوق مضروبةً في جيب الزاوية التي يحدث عندها الخط المضيء ذو الرتبة الأولى.

$$\lambda = d \sin \theta$$

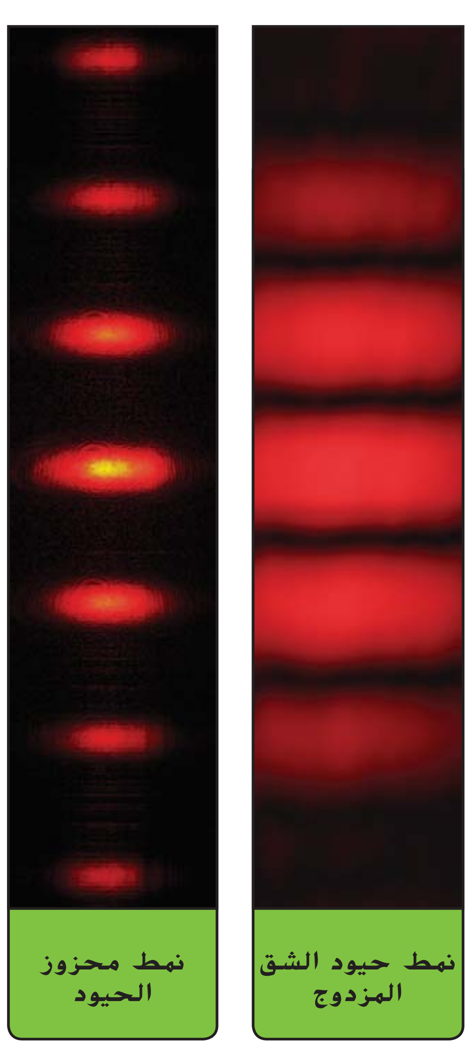
يحدث التداخل البنّاء بواسطة محزوز الحيود عند زوايا على جانبي الخط المركزي المضيء الذي تعبّر عنه المعادلة $m\lambda = d \sin \theta$، حيث $m = 0, 1, 2$، وهكذا. ويحدث الخط المركزي المضيء عند $m = 0$. يستخدم علماء التحليل الطيفي أحيانًا الخطوط التي تحدث عن $m = 2$ أو $m = 3$ لأنه يمكن قياس المسافات بين الخطوط المضيئة بشكل أكثر دقة. لاحظ أنّ الفراغ المعتم في نمط محزوز الحيود يكون أكبر منه في نمط الشق المزدوج كما في **الشكل 18**. وذلك لأنّ التداخل الهدّام الناتج في محزوز الحيود أكبر منه في الشق المزدوج. ينتج عن هذا خطوط أكثر ضيقًا، مما يزيد من دقة القياسات أيضًا.

تدخل محزوزات الحيود في تركيب المناظير الطيفية المستخدمة في تحليل الأحجار الكريمة. يدرك علماء الأحجار الكريمة ذوو الخبرة أنماطَ الحزم الناتجة عن مرور الضوء الأبيض عبر الأحجار المختلفة. على سبيل المثال، تُعدّ الحزم الثلاث المضيئة بالألوان الأخضر والأصفر والبرتقالي مؤشرًا قويًا على وجود الكوبالت. وهذا يعني أنّ حجرًا أزرق من المحتمل ألّا يكون جوهرة نفيسة كالياقوت الأزرق أو التوباز، بل قطعة زجاجية زهيدة الثمن مشوبة باللون الأزرق.

الشكل 17 يُستخدم المنظار الطيفي ذو المحزوز في قياس الطول الموجي للضوء بشكل دقيق.

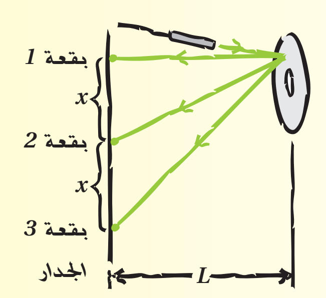
اذكر التبسيط المستخدم لحسابات الطول الموجي الناتج عن الشق المزدوج الذي لا ينطبق على محزوزات الحيود.



الشكل 18 يوضح الشكل مقارنة بين نمطي الحيود للضوء الأحمر. يوفّر نمط محزوز الحيود قياسًا أكثر دقة.

مثال 3

استخدام قرص DVD بوصفه محزوز حيود لاحظت طالبة طيفًا رائعًا منعكسًا عن قرص DVD، حيث وجّهت شعاعًا من مؤشر الليزر الأخضر الخاص بمعلمتها نحو قرص الـ DVD فوجدت ثلاث بقع مضيئة قد انعكست على الجدار. وظهر على المؤشر أنّ الطول الموجي 532 nm. ووجدت الطالبة أنّ الفراغات بين هذه البقع كانت 1.29 m على الجدار الذي يبعُد مسافة 1.25 m عن القرص. فما المسافة بين الفراغات على قرص الـ DVD؟



1 تحليل المسألة ورسمها

- ارسم التجربة، مبينًا قرص الـ DVD بوصفه محزوزًا والبقع الموجودة على الجدار.
- حدِّد القيم المعلومة وقم بتسميتها.

المعلوم	المجهول
$x = 1.29$ m	$d = ?$
$L = 1.25$ m	
$\lambda = 532$ nm	

2 حساب المجهول

أوجد الزاوية المحصورة بين البقعة المركزية المضيئة والبقعة المجاورة لها مستخدمًا $\tan\theta = \frac{x}{L}$.

$$\theta = \tan^{-1}\left(\frac{x}{L}\right)$$

$$= \tan^{-1}\left(\frac{1.29\text{ m}}{1.25\text{ m}}\right)$$ ◄ عوِّض مستخدمًا $x = 1.29$ m، $L = 1.25$ m.

$$= 45.9°$$

استخدم الطول الموجي لمحزوز الحيود وأوجد المتغيّر d.

$$\lambda = d \sin\theta$$

$$d = \frac{\lambda}{\sin\theta}$$

$$= \frac{532 \times 10^{-9}\text{ m}}{\sin 45.9°}$$ ◄ عوِّض مستخدمًا $\lambda = 532 \times 10^{-9}$ m، $\theta = 45.9°$.

$$= 7.41 \times 10^{-7}\text{ m} = 741\text{ nm}$$

3 تقييم الإجابة

- **هل الوحدات صحيحة؟** الإجابة بوحدة m، وهي وحدة صحيحة للمسافة الفاصلة.
- **هل الجواب منطقي؟** عندما يكون لـ x و L الحجم نفسه غالبًا، تكون قيمة d قريبة من قيمة λ.

تطبيقات

.21 يسقط ضوء أبيض من خلال محزوز على شاشة. صِف النمط الناتج.

.22 إذا سقط ضوء أزرق طوله الموجي 434 nm على محزوز حيود، وكانت المسافة الفاصلة هي 0.55 m بين الخطوط الناتجة على شاشة تبعُد 1.05 m، فما المسافة الفاصلة بين الشقوق في المحزوز؟

.23 يضاء محزوز حيود تفصل بين شقوقه مسافة 8.60×10^{-7} m بضوء بنفسجي طوله الموجي 421 nm. إذا كانت الشاشة على بُعد 80.0 cm من المحزوز، فما مقدار المسافات الفاصلة بين الخطوط في نمط الحيود؟

.24 يسقط ضوء أزرق على قرص DVD في مثال المسألة 3. إذا كانت المسافات الفاصلة بين النقاط المتكوّنة على جدار يبعُد 0.65 m تساوي 58.0 cm، فما مقدار الطول الموجي؟

.25 **تحفيز** يمرّ ضوء طوله الموجي 632 nm عبر محزوز حيود ويكوِّن نمطًا على شاشة تبعُد مسافة 0.55 m عن المحزوز. إذا كانت الحزمة المضيئة الأولى على بُعد 5.6 cm من الحزمة المركزية المضيئة، فما عدد الشقوق لكل سنتيمتر في المحزوز؟



الشكل 19 تسبب الفتحة حيود الضوء فتنشئ نمط حيود يحوي بقعة مركزية مضيئة محاطة بحلقات معتمة ومضيئة.

قدرة التحليل للعدسات

تعمل العدسة المستديرة في التلسكوب والمجهر وحتى عينك عملَ فجوة، وتُسمى فتحة، ليمرّ الضوء من خلالها. وتسبب الفتحة حيود الضوء، تمامًا كما يفعل الشق الأحادي، وتنتج حلقات مضيئة ومعتمة متعاقبة بواسطتها، كما هو مبيّن في **الشكل 19**. فضلًا عن ذلك، تكون معادلة حساب الفتحة مماثلة لمعادلة حساب الشق الأحادي. لكن يكون للفتحة حافة دائرية بدلًا من حافتي الشق. لذا يُستبدل عرض الشق (w) بقطر الفتحة (D)، بالإضافة إلى إدخال عامل هندسي مقداره 1.22. فتصبح المعادلة $x_1 = \frac{1.22\lambda L}{D}$.

◀ الربط بعلم الفلك عندما يُرى الضوء المنبعث من نجم بعيد بواسطة فتحة التلسكوب، فإنّ الصورة تنتشر بسبب الحيود. إذا كان يوجد نجمان قريبان جدًا أحدهما إلى الآخر، فإنّ صورتيهما تتداخلان معًا. في العام 1879، وضع الفيزيائي والرياضي البريطاني لورد ريليه، الحائز على جائزة نوبل، معيارًا لتحديد ما إذا كان يوجد نجم أم اثنان في مثل هذه الصورة. ينص **معيار ريليه** على أنه إذا سقط مركز البقعة المضيئة لصورة أحد النجمَين على الحلقة المعتمة الأولى للنجم الثاني، فإنّ الصورتين تكونان عند حد التمييز. وإذا كانت صورتا النجمين عند حد التمييز، فسيكون المشاهد قادرًا على تحديد وجود نجمين بدلًا من نجم واحد فقط.

إذا كان جسمان عند حد التمييز، فكيف يمكنك إيجاد المسافة بينهما (x_{obj})؟ طبقًا لمعيار ريليه، تكون المسافة بين مركزي بقعتين مضيئتين لصورتين هي x_1. يوضّح **الشكل 20** أنه يمكن استخدام المثلثات المتماثلة لإيجاد أنّ $\frac{x_{obj}}{L_{obj}} = \frac{x_1}{L}$. ويمكننا جمع هذه المعادلة مع معادلة حجم الفتحة $\left(\frac{x_1}{L} = \frac{1.22\lambda}{D}\right)$ وإيجاد المسافة بين الجسمين (x_{obj}).

معيار ريليه

تساوي المسافة الفاصلة بين جسمين عندما يكونان عند حد التمييز 1.22 مضروبًا في الطول الموجي للضوء والمسافة من الفتحة المستديرة إلى الجسمين مقسومًا على قطر الفتحة المستديرة.

$$x_{obj} = \frac{1.22\lambda L_{obj}}{D}$$

تجربة مصغرة

شاشة عرض شبكية كيف تُستخدم شبكية العين بوصفها شاشة؟

■ فتحة التلسكوب

الصورة

فتحة التلسكوب

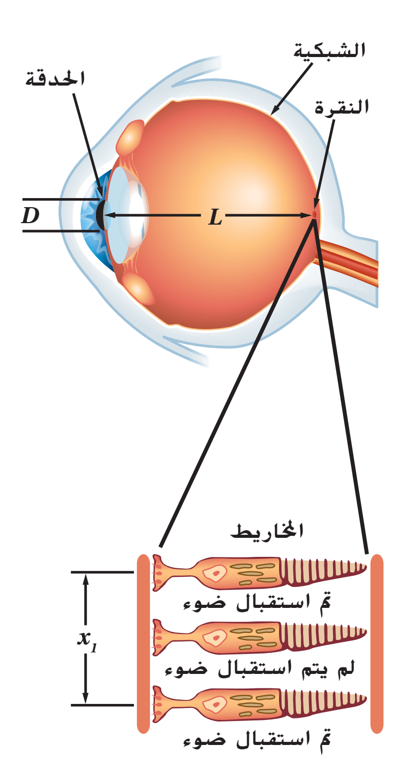
x_1 x_{obj} L L_{obj}

الشكل 20 يمكن حساب المسافة الفاصلة بين جسمين باستخدام هندسة المثلثات المتماثلة. إنّ اللونين الأزرق والأحمر للتوضيح فقط. (الرسم التوضيحي ليس مقياسًا).

الحيود في العين عندما يكون الضوء ساطعًا، يكون قطر حدقة العين 3 mm تقريبًا. وتكون حساسية العين أكبر ما يكون للضوء الأصفر المخضر حيث الطول الموجي $\lambda = 550$ nm. لذا بتطبيق معيار ريليه على العين يُعطي $x_{obj} = (2 \times 10^{-4})L_{obj}$. وتبلغ المسافة بين الحدقة والشبكية 2 cm تقريبًا، لذا باستخدام $x_1 = 1.22\lambda L/D$. سيكون من الصعب التمييز بين مركزي البقعتين المضيئتين لمصدرين نقطيين عندما تفصل بينهما مسافة 4 μm تقريبًا على الشبكية. تبلغ المسافة الفاصلة بين المخاريط، التي هي عبارة عن كاشفات ضوئية في الشبكية، في أكثر الأجزاء حساسية في الشبكية، وهي النُقرة، 2 μm تقريبًا. لذا تُسجل المخاريط الثلاثة المتجاورة في الحالة المثالية ضوءًا وعتمة وضوءًا، كما هو موضّح في **الشكل 21**. يجب أن تكون المسافة بين مركزي البقعتين المضيئتين من مصدرين نقطيين مساوية على الأقل للمسافة بين مخروطي تسجيل الضوء لتمييزهما. وتبدو العين مثالية التركيب.

يدل تطبيق معيار ريليه لإيجاد قدرة العين على التمييز بين مصدرين متباعدين على أنّ العين يمكنها التمييز بين المصباحين الأماميين (المسافة بينهما 1.5 m) لسيارة على بُعد 7 km. لكن عمليًا، لا يحد الحيود من عمل العين إذ تؤدي العيوب في العدسة والسائل الذي يملأ العين إلى التقليل من قدرة التمييز للعين بمقدار خمس مرات وفق معيار ريليه. كما تُحدّ مراكز معالجة الرؤية في دماغ الإنسان من القدرة على اكتشاف الأجسام النقطية الصغيرة.

يعلن العديد من الشركات المصنعة للتلسكوب أنّ أجهزتها محدودة الحيود، وهذا يعني أنّ أجهزتها قادرة على التمييز بين مصدرين نقطيين عند حد معيار ريليه. وللوصول إلى هذا الحد، يجب عليهم صقل المرايا والعدسات بدقة تصل إلى عُشر الطول الموجي (55 nm تقريبًا). وكلما كبر قطر المرآة، زادت قدرة التمييز للتلسكوب إلا أنّ تفاعلات الضوء مع الغلاف الجوي للأرض تؤدي إلى عدم وصول التلسكوبات الموجودة على الأرض إلى حد الحيود. وتُعدّ دقة صور التلسكوبات الموجودة في الفضاء أفضل بكثير من دقة صور التلسكوبات الكبرى الموجودة على سطح الأرض.



الشكل 21 تُعدّ حدقة العين فتحة تسبب حيود الضوء.

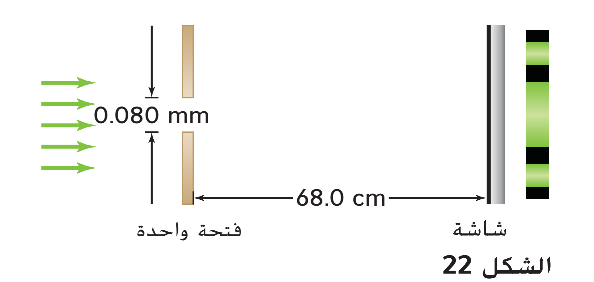
القسم 2 مراجعة

26. الفكرة الرئيسة قطعة كبيرة من الورق المقوى عليها شقوق كثيرة ضيقة وقريبة بعضها من بعض على مسافات متساوية. وأضيء هذان الشقان بضوء أحمر أحادي اللون. ووُضعت ورقة بيضاء بعيدًا عن الشقوق، فنتج نمط من الحزم المضيئة والمعتمة على الورقة. ارسم النمط الظاهر على الورقة.

27. معيار ريليه يُعدّ نجم الشِّعرى اليمانية (سيريوس) النجم الأكثر سطوعًا في نصف الكرة الأرضية الشمالي في فصل الشتاء. وهذا النجم، في الحقيقة، نظام مكوَّن من نجمين يدور كل منهما حول الآخر. إذا وُجِّه تلسكوب هابل الفضائي (قطر فتحته 2.4 m) نحو هذا النظام الذي يبعُد 8.44 سنوات ضوئية عن الأرض، فما أقل مسافة فاصلة بين النجمين نحتاج إليها لنتمكن من التمييز بينهما باستخدام التلسكوب؟ افترض أنّ الطول الموجي للضوء المنبعث من النجمين يساوي 550 nm.

28. المسافة بين الخطوط سلّطتَ ضوء ليزر أحمر إلى محزوز حيود فنتج نمط من النقاط الحمراء على شاشة. ثم استبدلتَ محزوز الحيود الأول بمحزوز حيود آخر، فنتج نمط مختلف. وكانت النقاط الناتجة عن المحزوز الأول أكثر انتشارًا من تلك الناتجة عن المحزوز الثاني. أي من المحزوزين يحتوي على خطوط أكثر لكل ملليمتر؟

29. الحزم المعتمة ذات الرتبة الأولى يسقط ضوء أخضر أحادي اللون طوله الموجي 546 nm على شق أحادي موضح عرضه وبُعده عن الشاشة في **الشكل 22**. ما مقدار المسافة الفاصلة بين الحزم المعتمة ذات الرتبة الأولى؟



الشكل 22

30. التفكير الناقد شاهدتَ مطيافًا إلا أنّك لا تعلم ما إذا كان الطيف الناتج عنه باستخدام منشور أو محزوز حيود. إذا نظرت إلى الطيف الناتج عن الضوء الأبيض المار عبر المطياف، فكيف يمكنك تحديد الجهاز الذي أنتج الطيف؟

مكافحة جرائم تزوير العملات بمحاكاة الطبيعية

التقزح اللوني في الفراشات والعملة

تُظهر حزم الألوان المتلألئة على جناحي فراشة الطاووس الإندونيسية ظلالًا مختلفة باللونَين الأخضر والأزرق عندما يتحركان. ربما يحتفظ التلوين المتقزح في هذه الفراشة الأكثر من رائع ذات يوم بسر الكشف عن النقود المزيفة.

يُغطى جناحا الفراشة بقشور صغيرة. يوضّح فحص هذه القشور بمجهر قوي أنها تتميّز بنمط من التجاويف الدقيقة والمتكررة.



ينعكس الضوء الساقط على مركز كل تجويف مباشرة، ولكن الضوء الساقط على حواف كل تجويف يمرّ من خلال تراكيب تستقطب الضوء وتعكسه وتبدو كمحزوز الحيود. تُعطي هذه التراكيب الجناحين لونهما الأخضر الفاتح أو الأخضر المزرق حسب زاوية الرؤية.

استطاع الباحثون تصميم بنية مجهرية مماثلة لقشور الفراشة المتقزحة في مادة صناعية متناهية الصغر. تتميّز هذه المادة بخصائص بصرية تشبه خصائص قشور الفراشة التي تحاكيها. يتوقّع الباحثون تطبيقها كتكنولوجيا لمكافحة التزييف لأنه يصعب محاكاتها مقارنة بالطرق المستخدمة حاليًا.

لمزيد من التعمق >>>

أعدّ بحثًا عن أمثلة أخرى لتأثيرات الألوان الموجودة في الطبيعة التي ترجع إلى التقزح اللوني. صمّم موقع ويب تثقيفيًا يوضح النتائج التي توصلت إليها.

الوحدة 8 دليل الدراسة

الفكرة الرئيسة يمكن أن تحيد الموجات الضوئية وتتداخل مع بعضها.

القسم 1 التداخل

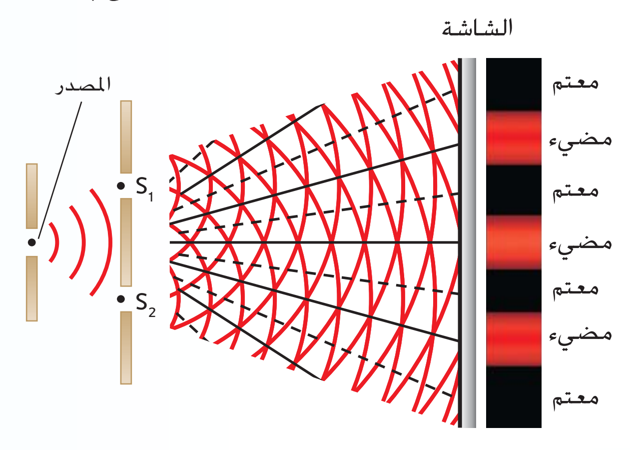
المفردات

- ضوء غير مترابط incoherent light
- ضوء مترابط coherent light
- أهداب التداخل interference fringes
- ضوء أحادي اللون monochromatic light
- تداخل في الأغشية الرقيقة thin-film interference

الفكرة الرئيسة يمكن أن يتداخل الضوء عند مروره عبر شقوق ضيقة أو عندما ينعكس عن غشاء رقيق.

- يمكن أن ينتج عن تراكب الموجات الضوئية من مصادر الضوء المترابطة نمط تداخل. يُنتج الضوء المار عبر شقين ضيقين قريبين جدًا نمطًا من الحزم المضيئة والمعتمة على شاشة، وتسمى أهداب التداخل.
- يمكن استخدام أنماط التداخل لقياس طول موجة الضوء.

$$\lambda = \frac{xd}{L}$$



- يمكن أن تنشأ أنماط التداخل من مرور الضوء من خلال غشاء رقيق. يمكن تمثيل التداخل في الأغشية الرقيقة بالأشعة المنعكسة من عدة أسطح من غشاء رقيق. تحدد معاملات الانكسار للأوساط التي يمرّ من خلالها الضوء وسُمك الغشاء مدى تداخل أطوال موجات الضوء المختلفة.

القسم 2 الحيود

المفردات

- نمط الحيود diffraction pattern
- محزوز الحيود diffraction grating
- معيار ريليه rayleigh criterion

الفكرة الرئيسة تحيد الموجات الضوئية عندما تمرّ عبر شق أحادي، وتحيد وتتداخل عندما تسقط على محزوز حيود.

- يحيد الضوء الذي يمر من خلال شق ضيق، وهذا يعني انتشاره من مسار في خط مستقيم ليُحدث نمط حيود على الشاشة. يرتبط عرض الحزمة المركزية المضيئة في نمط حيود الشق الأحادي بطول موجة الضوء المستخدم.
- تتكوّن محزوزات الحيود من أعداد كبيرة من الشقوق القريبة جدًا من بعضها وتُحدث خطوطًا طيفية ضيقة تنشأ من تداخل الضوء الذي يحيد من جميع الشقوق.
- يمكن استخدام محزوزات الحيود لقياس طول موجة الضوء بدقة أو لفصل الضوء المكون من أطوال موجة مختلفة.

$$\lambda = d \sin \theta$$

- يحدّ الحيود من قدرة الفتحة على التمييز بين جسمين متقاربين لأنّ الصورة الناتجة تحوي نقطة مركزية مضيئة منتشرة. إذا كانت نقطتان مضيئتان أقرب من حد الدقة، فستتداخل النقطتان ولا يمكن تمييز الأجسام.

القسم 1 التداخل

إتقان المفاهيم

31. لماذا يُعدّ استخدام ضوء أحادي اللون مهمًا في تكوين نمط التداخل في تجربة الشق المزدوج؟

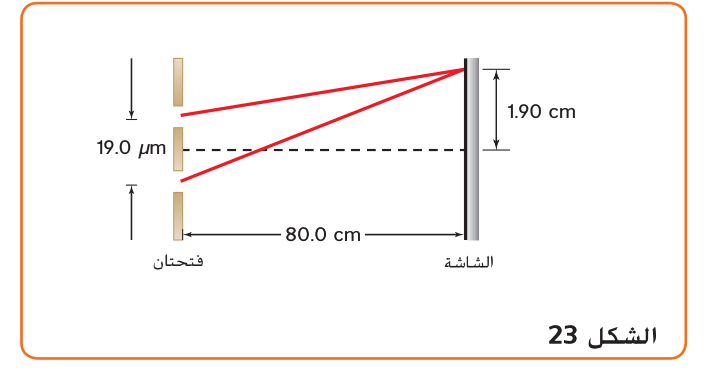
32. اشرح لماذا لا يمكن استخدام موقع الحزمة المركزية المضيئة لنمط تداخل الشق المزدوج لحساب الطول الموجي للضوء.

33. صِف طريقة استخدام ضوء معلوم الطول الموجي لإيجاد المسافة بين شقَّين ضيقين.

34. صِف بكلمات من عندك ما يحدث لتداخل الغشاء الرقيق عندما تنتج حزمة ملونة بواسطة ضوء ساقط على غشاء صابون معلق في الهواء. تأكد من أن تُضمِّن في شرحك العلاقةَ بين الطول الموجي للضوء وسمك الغشاء.

إتقان حل المسائل

35. سقط ضوء على شقين متباعدين بمقدار 19.0 μm ويبعُدان مسافة 80.0 cm عن شاشة، كما في **الشكل 23**. وكانت الحزمة المضيئة ذات الرتبة الأولى تبعُد 1.90 cm عن الحزمة المركزية المضيئة. فما الطول الموجي للضوء؟



الشكل 23

36. البقع النفطية أخذ علي وصالح قطتهما وخرجا في نزهة قصيرة بعد المطر، فلاحظا طبقة نفطية رقيقة معامل انكسار مادتها ($n = 1.45$) على سطح بركة صغيرة تُنتج ألوانًا مختلفة. ما أقل سمك لطبقة النفط عندما يُكوِّن النفط تداخلًا بناءً لضوء طوله الموجي 545 nm؟

37. سمك الغشاء وُضع غشاء بلاستيكي عاكس معامل انكساره ($n = 1.83$) على نافذة زجاجية ذاتية الحركة معامل انكسارها ($n = 1.52$). ما أقل سمك للغشاء سينعكس عنه ضوء أصفر مخضر طوله الموجي ($\lambda = 555$ nm)؟ لكن لسوء الحظ، لا يمكن صنع غشاء بهذا السمك. فما السمك التالي الذي يُحدث التأثير نفسه؟

38. غشاء العزل عندما اقترب فصل الشتاء، قام سالم بتغطية النوافذ في بيته برقاقات من البلاستيك الشفاف معامل انكساره ($n = 1.81$) ليمنع دخول تيارات الهواء. وبعد لصق الرقاقات البلاستيكية حول حواف النوافذ، قام بتسخينها باستخدام مجفف شعر لإحكام تثبيتها حول النوافذ، فأدى ذلك إلى تغيير السمك لكن لم يؤثر في معامل انكسار البلاستيك. ولاحظ سالم وجود خط أزرق في مكان ما على البلاستيك. فأدرك أنّ هذا الخط ناتج عن تداخل في الغشاء الرقيق. ما درجات السُمك الثلاث المحتملة التي تكوِّن خطًا أزرق إذا كان الطول الموجي للضوء 445 nm؟

39. ترتيب أنتجت خمسة مؤشرات ليزر مختلفة أنماطَ تداخل شق مزدوج. وفي كل حالة، كانت المسافة الفاصلة بين الشقين 0.035 mm. رتب الحالات التالية وفقًا للطول الموجي لمؤشرات الليزر، بدءًا من الأقصر إلى الأطول. أشر إلى الروابط على وجه التحديد.

A. عندما كان بُعد الشاشة عن الشقين 0.95 m، وكانت المسافة الفاصلة بين البقع المتجاورة المضيئة 12 mm.

B. عندما كان بُعد الشاشة عن الشقين 0.95 m، وكانت المسافة الفاصلة بين البقع المتجاورة المضيئة 16 mm.

C. عندما كان بُعد الشاشة عن الشقين 1.3 m، وكانت المسافة الفاصلة بين البقع المتجاورة المضيئة 20 mm.

D. عندما كان بُعد الشاشة عن الشقين 2.8 m، وكانت المسافة الفاصلة بين البقع المتجاورة المضيئة 40 mm.

E. عندما كان بُعد الشاشة عن الشقين 2.8 m، وكانت المسافة الفاصلة بين البقع المتجاورة المضيئة 50 mm.

القسم 2 الحيود

إتقان المفاهيم

40. الفكرة الرئيسة يُشع ضوء أبيض خلال محزوز حيود. هل تكون الفراغات بين الخطوط الحمراء الناتجة متقاربة أم متباعدة أكثر مقارنة بالخطوط البنفسجية الناتجة؟ لماذا؟

41. لماذا تتكوّن محزوزات الحيود من عدد كبير من الشقوق؟ لماذا تكون هذه الشقوق متقاربة جدًا؟

42. التلسكوبات لماذا يكون التلسكوب ذو القطر الصغير غير قادر على التمييز بين صورتين لنجمين متقاربين جدًا؟

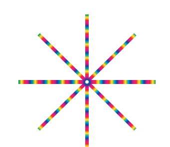
43. مسألة معكوسة اكتب مسألة فيزيائية تتضمن أجسامًا من واقع الحياة وتُمثّل المعادلة التالية جزءًا من الحل المطلوب لها:

$$x_1 = \frac{(2.00 \text{ m})(530 \text{ nm})}{0.20 \text{ nm}}$$

44. طرح المسائل أكمل هذه المسألة بحيث يتم حلها باستخدام معيار ريليه: "يتم تصنيع تلسكوب بحيث يكون قطر فتحته 8.0 m...."

45. ما لون الضوء المرئي الذي ينتج خطًا ساطعًا قريبًا جدًا من الحزمة المركزية المضيئة بالنسبة إلى محزوز حيود معين؟

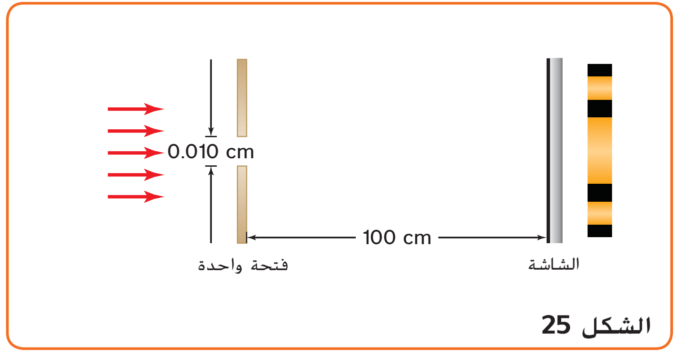
46. عندما تنظر من خلال نظارة فكاهية إلى مصباح متوهج، ترى خطوطًا رفيعة من ألوان الطيف تنبعث من الضوء في ثمانية اتجاهات كما في **الشكل 24**. فتلاحظ أنّ النظارة تعمل كمحزوزات حيود. ما اتجاهات الخدوش في هذه النظارة؟



الشكل 24

إتقان حل المسائل

47. يمرّ ضوء أحادي اللون خلال شق أحادي عرضه 0.010 cm ويسقط على شاشة تبعُد 100 cm. كما في **الشكل 25**. إذا كان عرض الحزمة المركزية 1.20 cm. فما مقدار الطول الموجي للضوء؟



الشكل 25

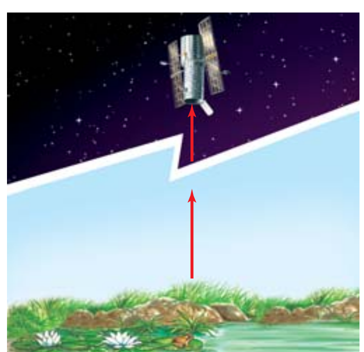
48. محزوز حيود جيد يحوي 2.5×10^3 خط لكل cm. ما المسافة بين كل خطين؟

49. يمرّ ضوء طوله الموجي 455 nm خلال شق أحادي ويسقط على شاشة تبعُد 100 cm. إذا كان عرض الشق 0.015 cm. فما المسافة بين مركز النمط والحزمة المعتمة الأولى؟

50. الكاليدوسكوب أُزيلت المرايا من كاليدوسكوب. وكان قطر فتحة العين عند الطرف الخلفي 7.0 mm. إذا كان من الصعب تمييز بقعتين صغيرتين لونهما أرجواني يميل إلى الزرقة موجودتين على الجانب الآخر من الكاليدوسكوب وتفصل بينهما مسافة 40 µm. فما طول الكاليدوسكوب؟ استخدم الطول الموجي $\lambda = 650$ nm وافترض أنّ الدقة محدودة الحيود بواسطة فتحة العين.

51. يمرّ ضوء أحادي اللون طوله الموجي 425 nm خلال شق أحادي ويسقط على شاشة تبعُد 75 cm. إذا كان عرض الحزمة المركزية المضيئة 0.60 cm. فما عرض الشق؟

52. تلسكوب هابل الفضائي افترض أنّ تلسكوب هابل الفضائي الذي قطره 2.4 m في مدار يبعُد 1.0×10^5 m فوق الأرض قد أُدير نحو الأرض لتصويرها، كما في **الشكل 26**. إذا أهملنا تأثير الغلاف الجوي، فما حجم الجسم الذي يمكن أن يحلله التلسكوب؟ استخدم الطول الموجي $\lambda = 515$ nm.



الشكل 26

53. المنظار الطيفي يُستخدم في منظار طيفي محزوز حيود يحوي 12,000 خط لكل cm. أوجد الزاويتين اللتَين توجد عندهما الخطوط المضيئة ذات الرتبة الأولى لكل من الضوء الأحمر الذي طوله الموجي (632 nm) والضوء الأزرق الذي طوله الموجي (421 nm).

تطبيق المفاهيم

54. معرض العلوم في معرض علوم، كان أحد المعروضات عبارة عن غشاء كبير جدًا من الصابون ذي سمك ثابت تقريبًا. ويُضاء بواسطة ضوء طوله الموجي 432 nm. فيظهر السطح كاملًا تقريبًا على شكل ظل أرجواني رائع. فماذا تشاهد في الحالات التالية؟

a. عندما يتضاعف سمك الغشاء.

b. عندما يزداد سمك الغشاء بمقدار نصف الطول الموجي للضوء الساقط.

c. عندما يتناقص سمك الغشاء بمقدار ربع الطول الموجي للضوء الساقط.

55. ما أوجه الاختلاف في خصائص أنماط الحيود الناتجة عن محزوزات الحيود التي تحوي 10^4 خط لكل cm و10^5 خط لكل cm؟

56. تحدي مؤشر الليزر لديك مؤشرا ليزر، أحدهما ضوءه أحمر والآخر ضوءه أخضر. واختلف زميلاك أحمد وفارس في تحديد أي منهما له طول موجي أكبر. وأصرَّ أحمد على أنّ الضوء الأحمر طوله الموجي أكبر، بينما فارس متأكد أنّ الضوء الأخضر له طول موجي أكبر. ولديك قرص مدمج متوفر. صِف العرض الذي ستنفذه بهذه الأداة وطريقة شرح النتائج التي توصّلتَ إليها لكل من فارس وأحمد لحل الخلاف بينهما.

57. صِف كيف ستوضّح ما إذا كان نمط ما ناتج عن شق أحادي أم شق مزدوج؟

التقويم

.58 الميكروسكوب البصري لماذا يُستخدم الضوء الأزرق للإضاءة في ميكروسكوب بصري؟

.59 وضِّح في كل من الأمثلة التالية ما إذا كان اللون ناتجًا عن التداخل في الأغشية الرقيقة أم عن الانكسار أم عن وجود صبغات.

a. فقاعات الصابون
b. بتلات وردة
c. أغشية زيتية
d. قوس قزح

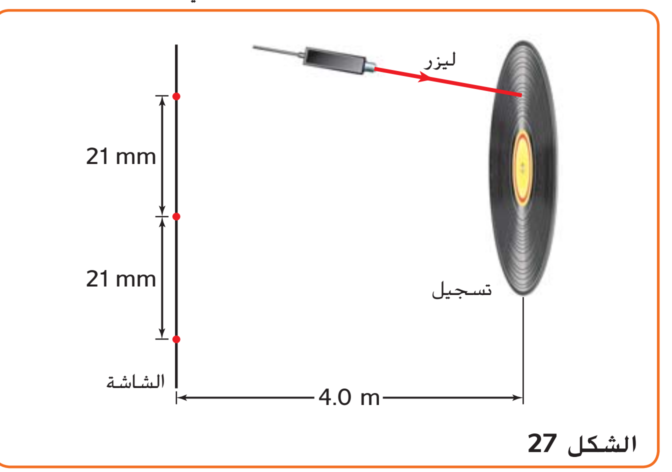
.60 صِف التغييرات في نمط حيود شق أحادي عندما يتناقص عرض الشق.

مراجعة عامة

.61 أسطوانة الفونوغراف تستخدم منى أسطوانة فونوغراف قديمة سرعة دورانها $33\frac{1}{3}$ كمحزوز حيود. وسلَّطت ليزرًا طول ضوئه الموجي $\lambda = 632.8$ nm على أسطوانة الفونوغراف، كما في **الشكل 27**. فرأت مجموعة من النقاط الحمراء يتباعد بعضها عن بعض مسافة 21 mm على شاشة تبعُد 4.0 m.

a. كم عدد الخطوط في كل سنتيمتر على امتداد نصف قطر أسطوانة الفونوغراف؟

b. تحققت منى من النتائج التي توصلت إليها عندما لاحظت أن النتوءات تمثل أغنية مدتها 4.01 min وتشغل 16 mm على أسطوانة الفونوغراف. فكم عدد الخطوط في كل سنتيمتر؟



الشكل 27

.62 الكاميرا تم ضبط كاميرا عدستها 50 mm على $\frac{f}{8}$، فكان قطر فتحتها 6.25 mm.

a. يستشعر مكشاف جهاز اقتران الشحنة الذي يبعُد 50.0 mm الضوءَ عند طول موجي $\lambda = 550$ nm. ما دقة العدسة؟

b. يعرف مالك الكاميرا أنّ أقصى دقة للصور هي 6.3 ميجا بكسل في مكشاف جهاز اقتران الشحنة. وتقول الشركة المُصنعة إن حجم كل بكسل 7.6 μm على كل جانب. قارن بين حجم البكسل وعرض البقعة المركزية المحسوبة في النقطة الفرعية a من السؤال.

.63 وُضع طلاء مانع للانعكاس معامل انكساره $(n = 1.2)$ على عدسة وكان سمك هذا الطلاء 125 nm. ما لون (ألوان) الضوء الذي يحدث عنده تداخل هدّام بصورة كاملة؟

التفكير الناقد

.64 طبِّق المفاهيم سقط ضوء أصفر على محزوز حيود. فتكوّنت ثلاث بقع على الشاشة خلف المحزوز: إحداهما عند الدرجة صفر حيث لا يحدث حيود، والثانية عند +30° والثالثة عند −30°. ثم أسقطتَ ضوءًا أزرق متماثل الشدة في اتجاه الضوء الأصفر نفسه. ما نمط البقع التي ستلاحظها على الشاشة الآن؟

.65 طبِّق المفاهيم يمرّ ضوء أزرق طوله الموجي λ عبر شق أحادي عرضه w. فظهر نمط حيود على شاشة. إذا استخدمتَ ضوءًا أخضر طوله الموجي 1.5λ بدلًا من الضوء الأزرق، فكم يجب أن يكون عرض الشق للحصول على النمط السابق نفسه؟

.66 التحليل والاستنتاج يكون قطر حدقة العين البشرية 8.0 mm أثناء الليل. في حين يقل هذا القطر أثناء النهار. ما المسافة التي يجب أن تبعُدها العين البشرية عن المصباحين الأماميين لسيارة بحيث يمكنها تمييز هذين المصباحين ليلًا، علمًا بأنّ المسافة الفاصلة بين المصباحين 1.8 m؟ تلميح: افترض أنّ الطول الموجي هو *525 nm*. ما العوامل المحددة الأخرى المحتملة إلى جانب الحيود؟

الكتابة في الفيزياء

.67 ابحث وصِف مساهمات العالم توماس يونج في الفيزياء. وقيِّم تأثير أبحاثه في الفكر العلمي حول طبيعة الضوء.

.68 يلمع الحجر الكريم أوبال متلألئًا بألوان قوس قزح. ابحث وصِف طريقة انتاج هذه الألوان.

.69 تتميّز تلسكوبات كثيرة ببصريات متكيفة تقلل من تأثيرات الغلاف الجوي التي تؤدي إلى تلألؤ النجوم. ابحث وصِف طريقة عمل أنظمة هذه التلسكوبات.

.70 ابحث ثم فسِّر دور الحيود في الطب وعلم الفلك. وصِف على الأقل تطبيقَين لكل منهما.

مراجعة تراكمية

.71 ما مقدار الشغل اللازم بذله لدفع مكعب خشبي حجمه $0.5\ m^3$ إلى قاع بركة سباحة عمقه 4 m؟ علمًا بأنّ كثافة الخشب $500\ kg/m^3$.

.72 ما الأطوال الموجية لموجات الميكروويف في فرن إذا كان تردد 2.4 GHz؟

.73 لديك مرآة مقعرة نصف قطرها 48.0 cm. ووُضع جسم طوله 2.0 cm على بُعد 12.0 cm منها. احسب بُعد الصورة وطولها.

.74 وُضعت شمعة طولها 2.00 cm على بُعد 7.50 cm من عدسة محدبة بعدها البؤريّ 21.0 cm. استخدم معادلة العدسة الرقيقة لحساب بُعد الصورة وطولها.

الاختيار من متعدد

1. ما أفضل تفسير محتمل لسبب تغيّر ألوان الغشاء الرقيق، مثل فقاعة الصابون أو الزيت على الماء وتحركها كما ترى؟

A. لأنّ موجات الحمل الحراري في الهواء بجانب الغشاء الرقيق تشوه الضوء

B. لأنّ سُمك الغشاء في موقع معيّن يتغيّر مع مرور الزمن

C. لأنّ أطوال موجة ضوء الشمس تختلف مع مرور الزمن

D. لأنّ رؤيتك تختلف إلى حد ما مع مرور الزمن

2. يظهر الضوء عند 410 nm من خلال شق ويسقط على شاشة مسطحة كما هو موضّح في الشكل التالي. يبلغ عرض الشق 3.8×10^{-6} m. ما عرض الحزمة المركزية المضيئة؟

A. 0.024 m   **C.** 0.048 m

B. 0.031 m   **D.** 0.063 m

3. في ما يتعلق بالحالة الموضّحة في المسألة 2، ما زاوية (θ) للحزمة الأولى المعتمة؟

A. 3.1°   **C.** 12°

B. 6.2°   **D.** 17°

4. يبعد نجمان عن الأرض بمقدار 6.2×10^{4} سنة ضوئية وتصل المسافة بينهما إلى 3.1 سنوات ضوئية. ما أصغر قطر لتلسكوب يمكن أن يميّز بينهما باستخدام ضوء طول موجته 610 nm؟

A. 5.0×10^{-5} m   **C.** 1.5×10^{-2} m

B. 6.1×10^{-5} m   **D.** 1.5×10^{7} m

5. تبعد شقوق محزوز عن بعضها بمقدار 0.055 mm. ما زاوية الخط المضيء ذي الرتبة الأولى لضوء طول موجته 650 nm؟

A. 0.012°   **C.** 1.0°

B. 0.68°   **D.** 11°

6. يضيء شعاع ليزر طول موجته 638 nm شقين ضيقين. تبعد الحزمة ذات الرتبة الثالثة للنمط الناتج عن الحزمة المركزية المضيئة بمقدار 7.5 cm. تبعد الشاشة عن الشقوق بمقدار 2.475 m. ما المسافة الفاصلة بين الشقين؟

A. 5.8×10^{-8} m   **C.** 2.1×10^{-5} m

B. 6.3×10^{-7} m   **D.** 6.3×10^{-5} m

7. وُضعت شاشة مستوية على بُعد 4.200 m من شقَّين مضائين بواسطة شعاع ضوء أحادي اللون. على الشاشة، تصل المسافة الفاصلة بين الحزمة المضيئة المركزية والحزمة المضيئة ذات الرتبة الثانية إلى 0.082 m. تبلغ المسافة بين الشقين 5.3×10^{-5} m. حدد طول موجة الضوء.

A. 2.6×10^{-7} m   **C.** 6.2×10^{-7} m

B. 5.2×10^{-7} m   **D.** 1.0×10^{-6} m

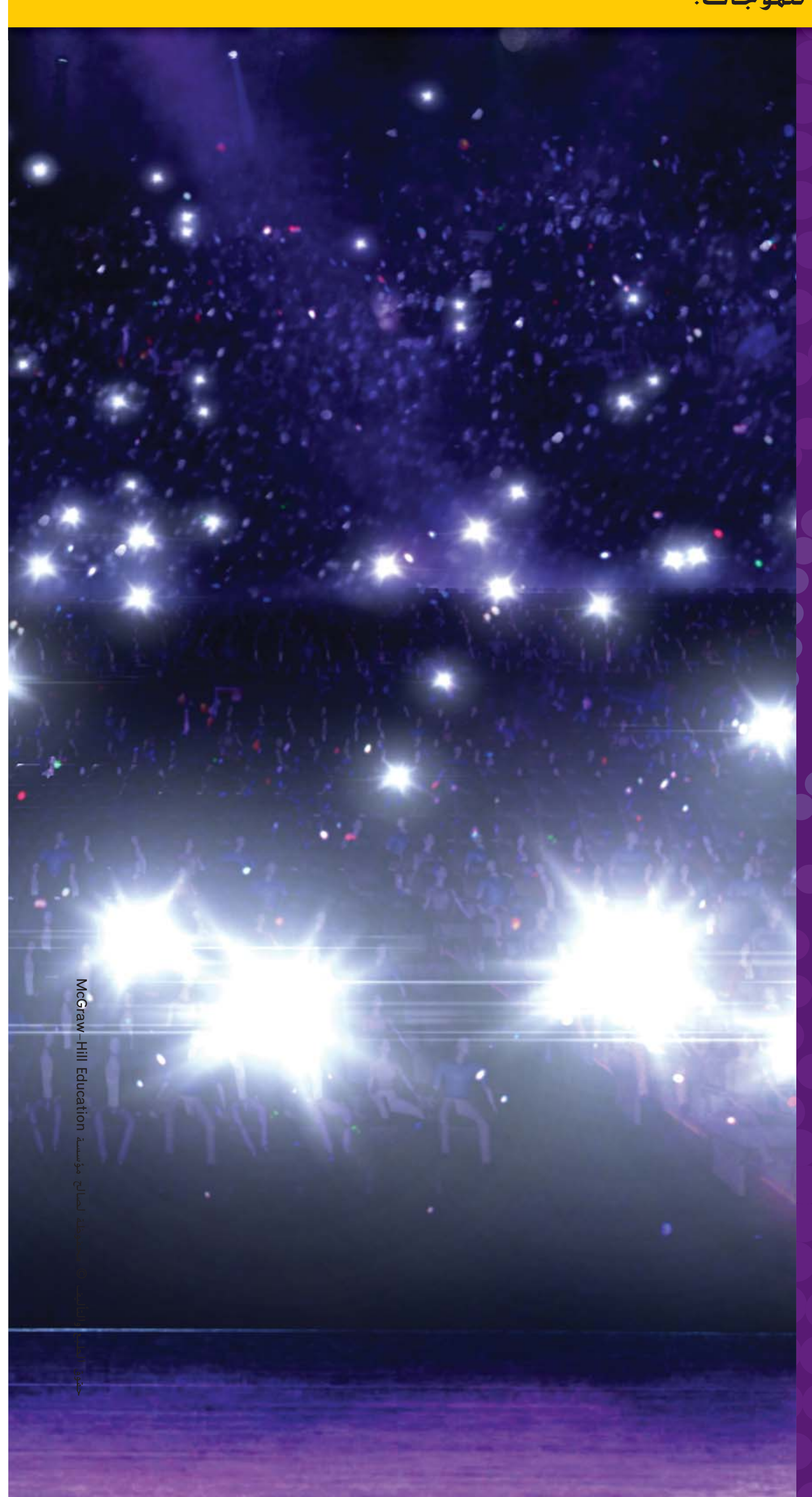
8. ينفخ مهرج فقاعات صابون وتلاحظ أنّ لون جزء واحد من الفقاعة الكبيرة بشكل خاص يوافق لون أنفه. إذا كانت الفقاعة تعكس موجات الضوء الأحمر بمقدار 6.5×10^{-7} m وكان معامل الانكسار لغشاء الفقاعة 1.41، فما الحد الأدنى لسمك فقاعة الصابون في الموقع الذي تعكس فيه الضوء الأحمر؟

A. 1.2×10^{-7} m   **C.** 9.2×10^{-7} m

B. 3.5×10^{-7} m   **D.** 1.9×10^{-6} m

أسئلة ذات إجابات مفتوحة

9. يُنتج محزوز حيود يتكون من 6000 شق لكل cm نمط حيود يتضمن خطًا مضيئًا من الرتبة الأولى عند 20° من الخط المركزي المضيء. فما الطول الموجي للضوء؟



الوحدة 9

نظرية الكم

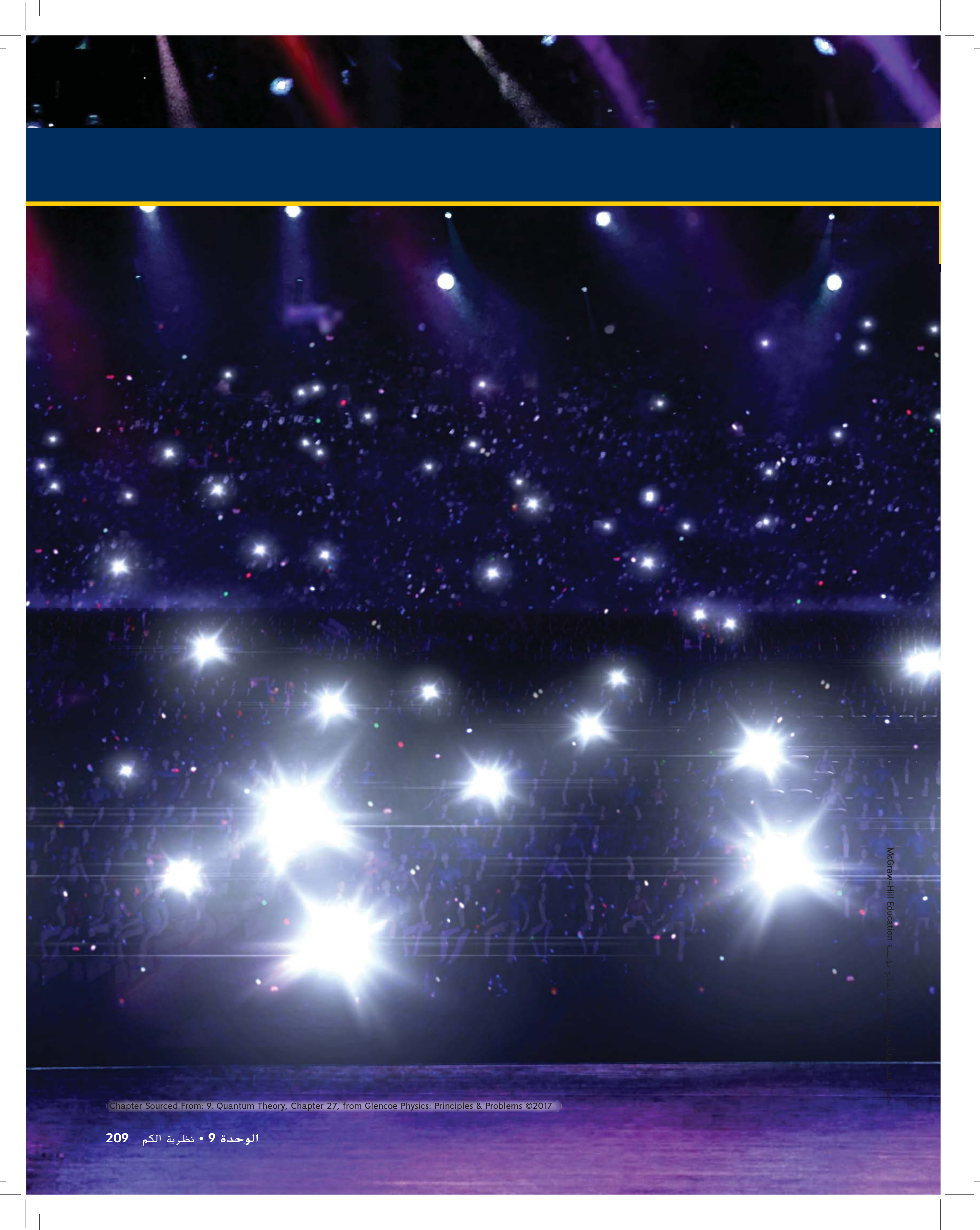
الفكرة الرئيسة يمكن أن يكون للموجات سلوك مشابه للجسيمات، كما يمكن أن يكون للجسيمات سلوك مشابه للموجات.

الأقسام

التجربة الاستهلالية

طيف ضوء المصباح

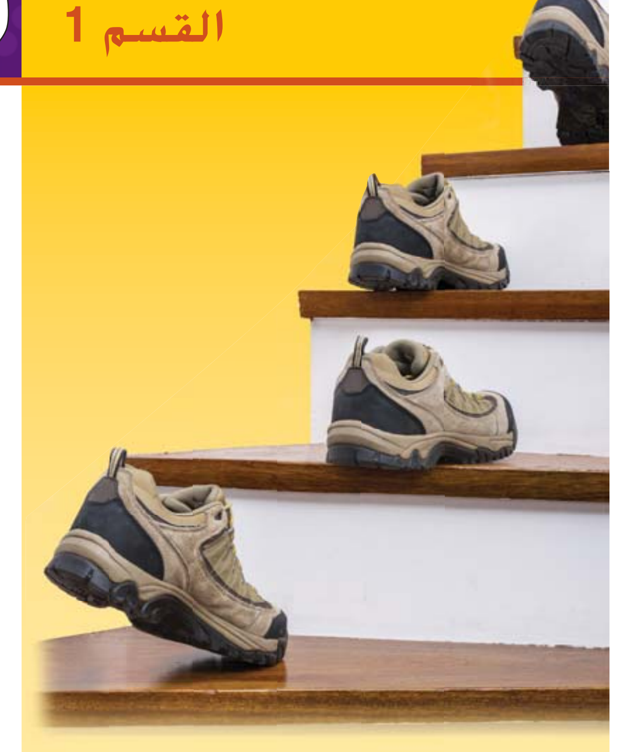
ما الذي يؤثر في الإشعاع الكهرومغناطيسي المنبعث من جسم ما؟



Chapter Sourced From: 9. Quantum Theory, Chapter 27, from Glencoe Physics: Principles & Problems ©2017

القسم 1

النموذج الجسيمي للموجات



الفيزياء في حياتك

لا بُدّ عند القيام بصعود درج ما من أن تقف على الدرجة الأولى أو الثانية أو الثالثة، ولكن لا يمكنك في أي حال من الأحوال أن تقف على الدرجة 1.381 أو الدرجة 3.5 مثلًا. وبطريقة مماثلة لا توجد الطاقة إلّا على صورة حزم تساوي مضاعفات صحيحة لمقدار الطاقة الأصغر.

الفكرة الرئيسة
يسلك الضوء سلوك مشابه لجسيمات عديمة الكتلة تُسمى الفوتونات.

الأسئلة الرئيسة
- ما خصائص الطيف الكهرومغناطيسي المنبعث من جسم ما؟
- ما المقصود بالتأثير الكهروضوئي؟
- ما المقصود بتأثير كومبتون؟

مراجعة المفردات

الموجة الكهرومغناطيسية electromagnetic wave: مجالات كهربائية ومغناطيسية مزدوجة ومتذبذبة تنتقل في الفراغ والمادة

مفردات جديدة

طيف الانبعاث emission spectrum
مكمم quantized
التأثير الكهروضوئي photoelectric effect
تردد العتبة threshold frequency
فوتون photon
دالة الشغل work function
تأثير كومبتون compton effect

نموذج جديد يعتمد على حزم الطاقة

دعمت التجارب التي أجراها العالم هينرش هيرتز نظرية الموجات الكهرومغناطيسية للعالم جيمس ماكسويل، إذ إنها أثبتت وجود هذه الموجات بشكل قاطع. ولقيت نظرية ماكسويل إقبالًا شديدًا إذ بدت قادرة على تفسير بعض الظواهر البصرية للضوء ومنها التداخل والحيود والاستقطاب وغيرها.

وعلى الرغم من ذلك لم تستطع نظرية ماكسويل التي اعتبرت أن الضوء موجات كهرومغناطيسية خالصة تفسير العديد من الظواهر المهمة الأخرى. ومن أبرزها ظاهرة أنّ كل الأجسام تبعث طيفًا من الموجات الكهرومغناطيسية. فقد خلصت الحسابات القائمة على نظرية الطيف الكهرومغناطيسي إلى أن الأجسام، مهما كانت درجة حرارتها، تبعث كمية لامتناهية من الطاقة، على صورة موجات كهرومغناطيسية. إضافة لذلك، اكتُشف أنّ الفلزات تبعث الإلكترونات بشكل غريب عندما يتعرّض سطح فلزّي إلى إشعاع فوق بنفسجي. ولا يمكن تفسير هاتين الظاهرتين إلا عندما ندرك أن الموجات الكهرومغناطيسية لها خصائص جسيمية إضافة إلى خصائصها الموجية.

الإشعاع الكهرومغناطيسي المنبعث من الأجسام يبيّن **الشكل 1** مصباحين متصلين بمصدر جهد ومفتاح تحكم يمكن من خلاله التحكم في شدة الإضاءة لأي من المصباحين. كلما ازداد فرق الجهد، ازدادت درجة حرارة الفتيلة المتوهجة. ونتيجة لذلك، يتغير اللون من الأحمر الداكن إلى البرتقالي، ثم إلى الأصفر، وأخيرًا إلى الأبيض. ويحدث هذا التغير في اللون لأن الفتيلة تبعث إشعاعًا بتردد أعلى مع ارتفاع حرارتها. في طرف الطيف المرئي عالي التردد يختلط اللونان الأزرق والبنفسجي باللونين الأحمر والبرتقالي، ما يؤدي إلى أن تظهر الفتيلة بيضاء.

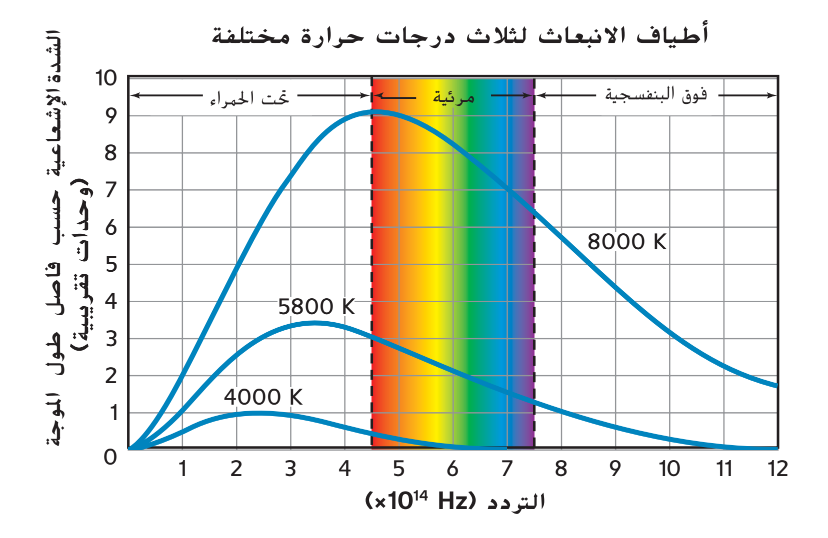
الشكل 1 يعتمد لون وهج المصباح على درجة حرارة الفتيلة..

درجة حرارة منخفضة



درجة حرارة مرتفعة





الشكل 2 يعتمد التردد الذي يصل عنده طيف انبعاث لجسم متوهج إلى أقصى شدة على درجة حرارة ذلك الجسم. فكلما ازدادت درجة حرارة الجسم، ازداد كذلك هذا التردد.

وفقًا لما توقعته النظرية الكهرومغناطيسية فإن الجسيمات المشحونة المهتزة في فتيل المصباح الكهربائي تبعث الضوء المرئي والأشعة تحت الحمراء. وبما أن كلّ الأجسام، مهما بلغت درجة برودتها أو سخونتها، تبث موجات كهرومغناطيسية، فإن الفتيلة تضيء في مدى الضوء المرئي لأنها ساخنة. ويقال إنها توهجت، ويوصف المصباح بأنه متوهج. وتعتمد الألوان التي تراها على شدة الموجات الكهرومغناطيسية المنبعثة بترددات مختلفة، وعلى حساسية عينيك لهذه الموجات.

أطياف الانبعاث ما الذي تتوقع مشاهدته عند النظر إلى فتيل المصباح المتوهج من خلال محزوز الحيود؟ تشاهد عند النظر إليه بهذه الطريقة جميع ألوان قوس قزح. يوضّح **الشكل 2** الألوان المرئية التي تتوافق مع الترددات القريبة من 6×10^{14} Hz. وفي الوقت نفسه ينبعث منه أشعة أخرى لا تستطيع رؤيتها ويُعرف التمثيل البياني لشدة الإشعاع المنبعث من جسم على مدى من الترددات باسم **طيف الانبعاث**. ويوضح **الشكل 2** أطياف انبعاث لجسم عند درجات الحرارة 4000 K و 5800 K و 8000 K. لاحظ أنه عند كل درجة حرارة ثمة تردّد تنبعث عنده قيمة عظمى من الطاقة. وإذا قارنت المنحنيات، تلاحظ أنه كلما ازدادت درجة الحرارة فإن التردد الذي ينبعث عنده القيمة العظمى من الطاقة يزداد أيضًا.

◄ **الربط بعلم الفلك** تزداد أيضًا القدرة الكلية المنبعثة من الجسم بزيادة درجة حرارته، أي أن قدرة الموجة الكهرومغناطيسية (الطاقة المنبعثة في الثانية) تتناسب طرديًا مع درجة الحرارة المطلقة للأجسام الساخنة مرفوعة للقوة الرابعة (T^4). وبالتالي فإن الأجسام الساخنة تشع، في كلّ ثانية، مقدارًا من الطاقة أكبر بكثير مما تشعه الأجسام الباردة. وتعد الشمس من أكثر الأمثلة شيوعًا على جسم ساخن يشع مقدارًا هائلًا من الطاقة. إذ تبلغ درجة حرارة الشمس حوالي 5800 K، وتشع قدرة مقداره 4×10^{26} W، وهذه كمية فعلًا هائلة. حيث يستقبل كل متر مربع من سطح الأرض حوالي 1000 J في الثانية (1000 W) من طاقة الشمس، وتكفي هذه الطاقة لإضاءة عشرة مصابيح قدرة الواحد منها 100 W.

☑ **التأكد من فهم النص** توقع مدى تغيُّر الطاقة المنبعثة من الجسم في حال تضاعفت درجة الحرارة المطلقة.

تجربة مصغرة

يلمع في الظلام

كيف يؤثر اختلاف الأطوال الموجية في الفلوروسين؟

تفسير أطياف الانبعاث حاول الكثير من الفيزيائيين خلال الفترة من 1887 إلى 1900م تفسير أطياف الانبعاث باستخدام نظرية الموجات الكهرومغناطيسية، لكنهم فشلوا جميعًا. يبيّن **الشكل 3** الفرق بين الطيف المتوقع والطيف الملحوظ. وفي العام 1900، وجد العالم الفيزيائي الألماني ماكس بلانك أن باستطاعته حساب الطيف فقط في حال افترض أن الذرات لا تبعث ولا تمتص إلّا كميات محددة من الطاقة. افترض بلانك أنَّ تغيّرات طاقة الذرة في الجسم الصلب تتناسب مع ناتج ضرب تردد الاهتزاز في عدد صحيح.

معادلة طاقة الاهتزاز

إنّ الطاقة التي تبعثها أو تمتصّها الذرة المهتزة تساوي ناتج ضرب عدد صحيح في ثابت بلانك وفي تردد الاهتزاز.

$$E = nhf$$

حيث يمثّل f تردد اهتزاز الذرة، ويمثّل h ثابت بلانك، وقيمته 6.626×10^{-34} J/Hz، ويمثّل n عددًا صحيحًا $0, 1, 2, 3 \ldots$

$n = 0$: $E = (0)hf = 0$

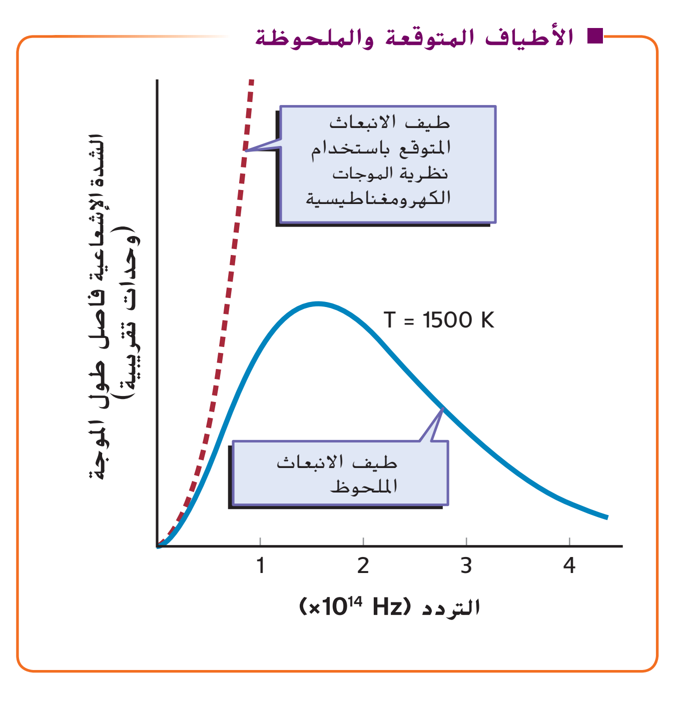
$n = 1$: $E = (1)hf = hf$

$n = 2$: $E = (2)hf = 2hf$

ويمكن أن تساوي طاقة الإشعاع (E) القيمة hf أو $2hf$ أو $3hf$ وما إلى ذلك، إلا أنّه من المستحيل أن تساوي قيمة كسرية مثل $\frac{2}{3}hf$ أو $\frac{3}{4}hf$. بعبارة أخرى، تُعدّ الطاقة **مكمّاة**، أي تتكوّن من حزم ذات كميات محددة. وعند إجراء الحسابات، يُقرّب الثابت h عادةً إلى 6.63×10^{-34} J/Hz.

تغيّر الاهتزازات تفترض نظرية الموجات الكهرومغناطيسية انبعاث الإشعاع من الذرات في كل الأوقات على نحو مستمر. إلا أن بلانك اقترح بديلًا لذلك يقول بأنّ الذرات تبعث إشعاعًا فقط في اللحظات المحددة التي عندها تتغير طاقة اهتزازها. فعلى سبيل المثال، إذا تغيّرت طاقة اهتزاز ذرة من $3hf$ إلى $2hf$، فإنَّ الذرة تصدر إشعاعًا أثناء تغيُّر الطاقة فقط. تساوي الطاقة المنبعثة التغيّر في طاقة الذرة، وهي في هذه الحالة hf. وبالمثل، إذا امتصت الذرة طاقة قدرها hf، فقد تتغيّر طاقتها من $2hf$ إلى $3hf$.

اكتشف بلانك أنّه نظرًا إلى أنَّ قيمة الثابت h صغيرة للغاية، يكون تغيّر الطاقة صغيرة جدًا كذلك، لدرجة أنها تكون غير ملحوظة في حركات الأجسام في الحياة اليومية. وظلت فكرة الطاقة المكمّاة مصدر حيرة لعلماء الفيزياء، ولبلانك ذاته. وتعد هذه أول إشارة إلى أنَّ الفيزياء الكلاسيكية لنيوتن وماكسويل قد لا تكون قابلة للتطبيق إلا في ظروف معينة. لقد كانت فكرة بلانك هذه بمثابة أول خطوة في تطوير خلايا الطاقة الشمسية والإلكترونيات الحديثة وأجهزة الكمبيوتر.



الشكل 3 يوضّح الخط الأحمر المتقطّع طيف الانبعاث المتوقع وفقًا لنظرية الموجات الكهرومغناطيسية. تتوقع النظرية أَنَّ الجسم سيشع مقدارًا غير محدود من الطاقة. وهذا لا يُطابق طيف الانبعاث الملحوظ، الموضّح باللون الأزرق.

حدّد المنطقة التي تمثّل فيها نظرية الموجات الكهرومغناطيسية نموذجًا جيدًا لطيف الانبعاث الملحوظ في التمثيل البياني.

تجربة مصغرة

نمذجة الكم كيف يمكنك تحديد أصغر وحدة من عينة كبيرة؟

مختبر الفيزياء

نمذجة التأثير الكهروضوئي

كيف يمكنك استخدام كرات الصلب لنمذجة التأثير الكهروضوئي؟

التأثير الكهروضوئي

واجه علماء الفيزياء في مطلع القرن العشرين تحدّيًا آخر لم تتمكّن نظرية الموجات الكهرومغناطيسية من تفسيره. لوحظ أنه عند سقوط ضوء الأشعة فوق البنفسجية على لوح من الزنك مشحون بشحنة سالبة، يمكن أن يفرغ اللوح كهربائيًا – أي يطلق تدفقًا من الإلكترونات – حتى ولو كانت شدة ضوء الأشعة فوق البنفسجية منخفضة الكثافة. وعندما يسقط الضوء المرئي على اللوح المشحون نفسه، لا يفرغ كهربائيًا، حتى لو كانت شدة الضوء المرئي عالية.

إنّ هذه النتيجة تتناقض مع نظرية الموجات الكهرومغناطيسية، التي تتوقع انبعاث إلكترونات من اللوح مهما كان تردّد الإشعاع الكهرومغناطيسي الذي يسقط عليه. ويُعدّ كل من الأشعة فوق البنفسجية العالية التردد والضوء المرئي المنخفض التردد شكلين من أشكال الإشعاع الكهرومغناطيسي، فلماذا يتسبب أحدهما دون الآخر في لوح الخارصين تفريغًا كهربائيًا؟ يُطلق على انبعاث الإلكترونات عند سقوط إشعاع كهرومغناطيسي على جسم ما اسم **التأثير الكهروضوئي**.

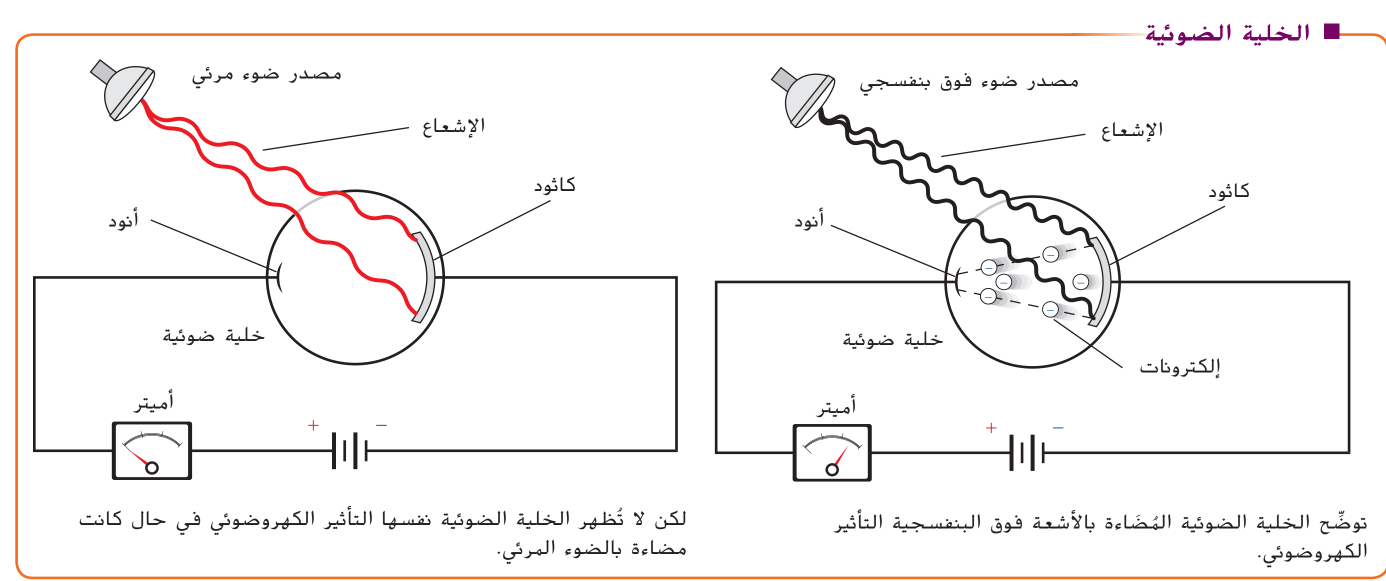
الخلية الضوئية يمكن دراسة التأثير الكهروضوئي في الخلية الضوئية الموضّحة في **الشكل 4**. تحتوي الخلية على قطبين فلزيين مثبّتين بإحكام في أنبوب مفرّغ من الهواء ومحكم الإغلاق. والهدف من إحكام الاغلاق هو منع تأكسد سطحي الفلزيين، ومنع تباطؤ الإلكترونات أو توقفها نتيجة تفاعلها مع جسيمات الغازات الموجودة في الهواء. وعادة يطلى القطب الأكبر (الكاثود) المكون من صفيحة مقعرة بمادة السيزيوم، أو أي فلز قلوي آخر، في حين يصنع القطب الأصغر (الأنود) من سلك رفيع حتى يحجب أقل كمية ممكنة من الإشعاع، بينما يصنع الأنبوب من مادة الكوارتز حتى يسمح للأشعة فوق البنفسجية من النفاذ من خلاله. ويؤدي تطبيق فرق الجهد على القطبين (الكاثود والأنود) إلى جذب الإلكترونات في اتجاه المصعد.

وفي حالة عدم سقوط إشعاع على الكاثود (القطب السالب) لا يسري تيار في الدارة الكهربائية. ولكن عندما يسقط عليه إشعاع بترددات معينة ينتج تيار كهربائي يتم قياسه بواسطة الأميتر كما هو موضح في **الشكل 4**. تمتصّ الإلكترونات طاقة الأشعة فتتحرّر من تأثير طاقة الوضع التي تشدّها إلى الكاثود لتتدفق نحو الأنود أو القطب الموجب. فيشكّل تدفق هذه الإلكترونات –تُسمّى إلكترونات ضوئية– تيارًا يسري في الدارة الكهربائية.

الشكل 4 لا تتدفق الشحنات في الخلية الضوئية إلا إذا كان للإشعاع الساقط على المهبط القدر الكافي من الطاقة.

قارن بين الطول الموجي للأشعة فوق البنفسجية والطول الموجي للضوء المرئي. اعتمادًا على المقارنة، كيف تكون طاقة كل منهما؟

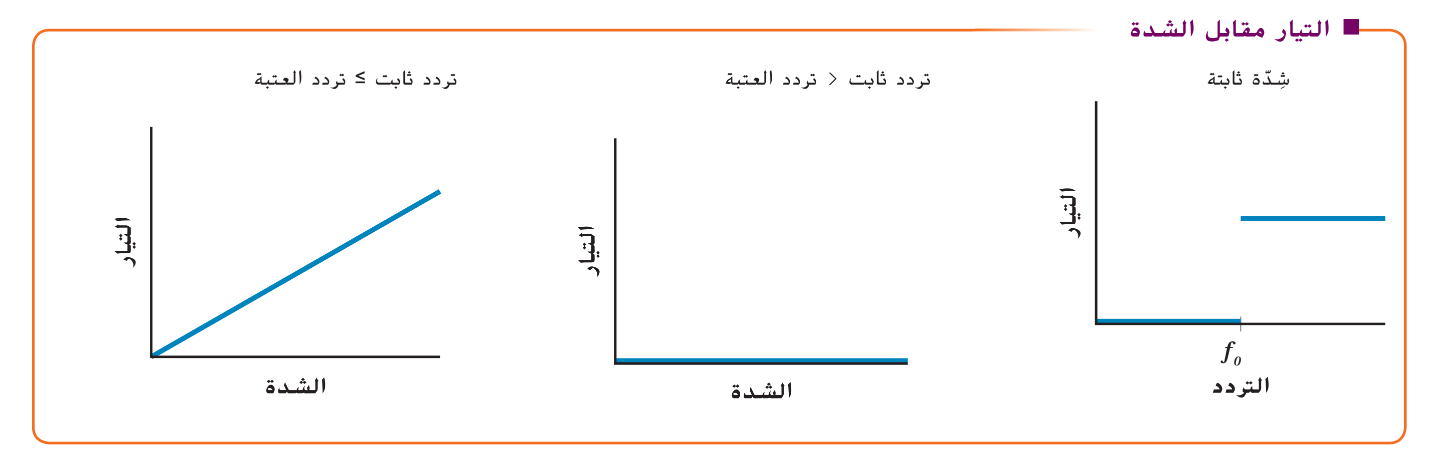
■ الخلية الضوئية



توضِّح الخلية الضوئية المُضَاءة بالأشعة فوق البنفسجية التأثير الكهروضوئي.

لكن لا تُظهر الخلية الضوئية نفسها التأثير الكهروضوئي في حال كانت مضاءة بالضوء المرئي.

■ التيار مقابل الشدة



الشكل 5 يعتمد انبعاث الإلكترونات المثارة بالضوء على تردد الضوء الساقط. لإنتاج إلكترونات مثارة بالضوء، لا بدّ من تجاوز تردد العتبة.

فيزياء في الحياة اليومية

الألواح الشمسية يُعدّ التأثير الكهروضوئي أساس تكنولوجيا الألواح الشمسية. التي تتكوّن من شبكة من الخلايا الشمسية المصنوعة من مواد شبه موصلة. يمكن أن تتسبب الفوتونات ذات تردد العتبة المحدد المنبعثة من الشمس في تحرّر الإلكترونات من ذرات المواد شبه الموصلة، ما ينتج عنه توليد تيار كهربائي داخل اللوح الشمسي.

تردد العتبة لا تؤدي كل الأشعة الساقطة على خلية ضوئية إلى توليد تيار كهربائي. فالإلكترونات لا تنبعث من الكاثود إلّا عندما يكون تردد الإشعاع الساقط عليه أكبر من قيمة صغرى محددة تسمى **تردد العتبة** (f_0). يوضّح التمثيل البياني إلى يمين **الشكل 5** أن التيار يتولّد فقط عندما يبلغ التردد هذه القيمة الصغرى ولكل فلز تردد عتبة خاص به يميزه عن غيره من الفلزات. فعلى سبيل المثال فإن جميع ألوان الضوء المرئي تستطيع أن تحرر إلكترونات من سطح السيزيوم ما عدا اللون الأحمر بسبب صغر تردده. بينما لا يحرر الضوء المرئي إلكترونات من سطح الزنك؛ لأننا نحتاج إلى أشعة فوق بنفسجية ذات التردد العالي لحدوث التأثير الكهروضوئي من سطح الزنك.

يوضّح التمثيل البياني الأوسط في **الشكل 5** أنّه لا يكون الإشعاع قادرًا على تحرير إلكترونات من سطح فلز مهما كانت شدته إذا كان تردده أقل من تردد العتبة. في حين يؤدي سقوط إشعاع شدته قليلة جدًا ولكن تردده مساوٍ أو أكبر من تردد العتبة إلى تحرير الإلكترونات من الفلز للتو. فعندما يكون تردد الإشعاع الساقط مساويًا أو أكبر من تردد العتبة، فإن زيادة شدة هذا الإشعاع تؤدي إلى زيادة تدفق الإلكترونات الضوئية. تنص نظرية الموجات الكهرومغناطيسية على أنَّ المجال الكهربائي في الموجة الضوئية يؤدي إلى تسارع الإلكترونات وخروجها من الفلز وترتبط قيمة المجال الكهربائي وطاقته بشدّة الضوء (ولا ترتبط بالتردد). ولذلك قد تحتاج الإلكترونات في الفلز إلى أن تمتص طاقة من مصدر ضوء خافت فترة زمنية طويلة جدًا لكي تتحرر وهذا غير صحيح . أكدت المشاهدات أن الإلكترونات تنطلق مباشرة حتى عندما يسقط على الفلز إشعاع ذو شدة منخفضة تردده مساوٍ أو أكبر من تردد العتبة.

الفوتونات والطاقة المكمَّاة نشر ألبرت أينشتاين في العام 1905 نظرية جديدة تمامًا قدمت تفسيرًا لظاهرة التأثير الكهروضوئي. وفقًا لنظرية أينشتاين، يتكوّن الضوء المرئي وغيره من أشكال الإشعاع الكهرومغناطيسي من حزم مكماة من الطاقة، أُطلق على الواحدة منها لاحقًا اسم **الفوتون**. تعتمد طاقة الفوتون على تردده.

طاقة الفوتون

تساوي طاقة الفوتون ناتج ضرب ثابت بلانك في تردد الفوتون.

$$E = hf$$

الإلكترون فولت في معادلة طاقة الفوتون، يمثّل f التردد بوحدة الهرتز (Hz)، ويمثّل h ثابت بلانك، بوحدة الجول لكل هرتز (J/Hz). وبما أنَّ وحدة Hz تُعرّف بأنها $\frac{1}{s}$ أو s^{-1}، فإنَّ وحدة ثابت بلانك $\frac{J}{Hz}$ تساوي J·s. ونظرًا إلى أنَّ الجول يُعدّ وحدة طاقة كبيرة جدًا لا يمكن استخدامها لقياس الأنظمة بحجم الذرة، تُستخدم وحدة الطاقة الأكثر ملاءمة وهي الإلكترون فولت (eV)، حيث يساوي إلكترون فولت واحد طاقة الإلكترون المتسارع بتأثير فرق جهد مقداره 1 V.

$$1\ \text{eV} = (1.602\times10^{-19}\ \text{C})(1\ \text{V})$$

$$= 1.602\times10^{-19}\ \text{C·V}$$

$$= 1.602\times10^{-19}\ \text{J}$$

وبالاعتماد على تعريف الإلكترون فولت يمكن إعادة كتابة معادلة طاقة الفوتون في صورة مُبسّطة كما يلي.

طاقة الفوتون

تساوي طاقة الفوتون ثابتًا مقداره 1240 eV·nm مقسومًا على الطول الموجي للفوتون.

$$E = \frac{hc}{\lambda} = \frac{1240\ \text{eV·nm}}{\lambda}$$

مختبر الفيزياء

الربط بين اللون وهبوط جهد مصباح LED

ما مدى تأثير الجهد في الطول الموجي للضوء المنبعث من مصباح LED؟

استراتيجيات حل المسائل

وحدات hc وطاقة الفوتون

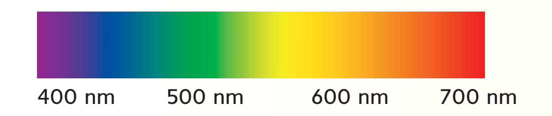
ينتج عن تحويل الكمية hc إلى وحدة الطاقة eV·nm معادلة مُبسّطة يمكنك استخدامها لحل المسائل التي تتضمّن الطول الموجي للفوتون.

1. يتم تحديد طاقة فوتون بدلالة التردد f باستخدام هذه المعادلة:
   $$E = hf$$
2. تذكر أنَّ $f = \frac{c}{\lambda}$، حيث تمثّل c سرعة الضوء في الفراغ. ومن ثمّ يمكن كتابة المعادلة السابقة بالصورة
   $$E = \frac{hc}{\lambda}$$
3. عند استخدام المعادلة $E = \frac{hc}{\lambda}$، إذا كانت قيمة hc بوحدة eV·nm مقسومة على λ بوحدة nm، فستحصل على الطاقة بوحدة eV. لذا من المفيد إيجاد قيمة hc بوحدة eV·nm. وبما أنَّ h و c ثابتان، فإنَّ قيمة hc تُعدّ ثابتًا أيضًا.
4. يتم تحويل hc إلى وحدة eV·nm كما يلي:
   $$hc = (6.626\times10^{-34}\ \text{J/Hz})\ (2.998\times10^{8}\ \text{m/s})\left(\frac{1\ \text{eV}}{1.602\times10^{-19}\ \text{J}}\right)\left(\frac{10^{9}\ \text{nm}}{1\ \text{m}}\right)$$
   $$= 1240\ \text{eV·nm}$$
5. باستبدال hc = 1240 eV·nm في معادلة حساب طاقة الفوتون تحصل على المعادلة التالية، حيث λ بوحدة nm و E بوحدة eV:
   $$E = \frac{hc}{\lambda} = \frac{1240\ \text{eV·nm}}{\lambda}$$
6. استخدم المعادلة السابقة لحل مسائل طاقة الفوتون، عندما يكون المطلوب إيجاد الطاقة بوحدة eV.

تطبيقات

استخدم $E = 1240\ eV{\cdot}nm/\lambda$ لحل المسائل التالية.

1. ما مقدار طاقة الفوتون الذي يساوي طوله الموجي 515 nm؟
2. إذا كانت طاقة الفوتون تساوي 2.03 eV. فما الطول الموجي للفوتون؟
3. رتّب الفوتونات التالية حسب الطاقة من الأصغر إلى الأكبر.
   A. 4.0 eV
   B. 320 nm
   C. 811 nm
   D. 2.1 eV
4. **تحفيز** يوضّح الرسم التخطيطي في **الشكل 6** طيف الضوء المرئي. ما مدى الطاقات المرتبطة بالفوتونات في طيف الضوء المرئي؟



الشكل 6

بلانك وأينشتاين

من المهم ملاحظة أنَّ نظرية الفوتون لأينشتاين تجاوزت نطاق فرضية بلانك في الإشعاع المنبعث من الأجسام الساخنة. فبينما اقترح بلانك أنّ الذرات المتذبذبة بتردد f تبعث إشعاعًا كهروضوئيًا بطاقة تساوي nhf، إلا أنّه لم يتطرق إلى أنَّ الضوء والأشكال الأخرى من الإشعاع الكهرومغناطيسي لها سلوك مشابه لسلوك الجُسيمات. أعادت نظرية الفوتون لأينشتاين تفسير فرضية بلانك حول الاشعاع المنبعث من الأجسام وعملت على توسيعها.

تُفسّر نظرية الفوتون لأينشتاين وجود تردد العتبة وانبعاث الإلكترونات أثناء ظاهرة التأثير الكهروضوئي، إذ يتمكن الفوتون ذو الحد الأدنى من التردد والطاقة (hf_0) من تحرير إلكترونًا من الفلز. أما إذا كان تردد الفوتون أقل من f_0، فلن يكون له الطاقة اللازمة لتحرير الإلكترون من الفلز. ونظرًا إلى تفاعل فوتون واحد مع إلكترون واحد، فلن يتمكن الإلكترون من تخزين طاقة فوتونات تردداتها أقل من تردد العتبة لكي يجمع مقدارًا كافيًا من الطاقة كي يتحرر. أما الإشعاع الذي يكون تردده أكبر من f_0 يكون له طاقة أكبر من الطاقة اللازمة لتحرير الإلكترون. وتتحوّل الطاقة الزائدة، $hf - hf_0$، إلى طاقة حركية قصوى للإلكترونات المنبعثة.

الطاقة الحركية للإلكترون المنبعث نتيجة التأثير الكهروضوئي
تساوي الطاقة الحركية للإلكترون المنبعث الفرق بين طاقة الفوتون الساقط (hf) وطاقة الفوتون عند تردد العتبة (hf_0).

$$KE = hf - hf_0$$

لاحظ أنَّ hf_0 تمثّل الحد الأدنى من الطاقة اللازمة لتحرير الإلكترون الأقل ارتباطًا بالذرة. وبما أن جميع الإلكترونات الموجودة في الفلز لا تمتلك المقدار نفسه من الطاقة فإن بعضها يحتاج إلى مقدار أكبر من الحد الأدنى من الطاقة حتى يتحرر. وهذا ما يفسر امتلاك الإلكترونات المتحررة من الفلز مقادير مختلفة من الطاقة الحركية وبالتالي اختلاف سرعة الإكترونات المتحررة من سطح الفلز. يحتاج بعضها إلى مقدار أكثر من ذلك الحد الأدنى من الطاقة حتى يتحرر.

☑ **التأكد من فهم النص** وضّح كيف يمكن أن يكون للإلكترون المنبعث بفعل التأثير الكهروضوئي مقدار من الطاقة الحركية أقل من طاقة العتبة.

اختبار نظرية الفوتون يمكن اختبار نظرية الفوتون لأينشتاين عن طريق قياس الطاقة الحركية المتحررة بطريقة غير مباشرة بواسطة جهاز خاص كالموضح في **الشكل 7** حيث يستخدم فرق جهد متغير لضبط فرق الجهد المطبق بين قطبي الخلية الكهروضوئية، ونتيجة لضبط فرق الجهد تخسر الإلكترونات المتحررة طاقة للوصول إلى الأنود، وتصل إليه فقط الإلكترونات المتحررة من الكاثود وذات الطاقة الحركية العالية.

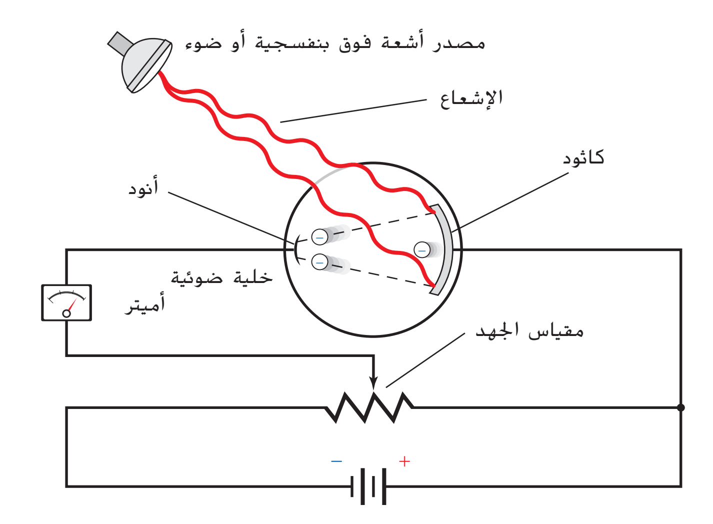
وكلما ازداد فرق الجهد المعاكس، تحتاج الإلكترونات إلى طاقة حركية أكبر للوصول إلى الأنود، وبالتالي يصل إليه عدد قليل من الإلكترونات لتكمل الدائرة.

عند فرق جهد معين، يسمى جهد الإيقاف، لن تكون للإلكترونات طاقة حركية كافية للوصول إلى الأنود، وبالتالي يتوقف سريان التيار. وعند جهد الإيقاف تكون الطاقة الحركية للإلكترونات عند الكاثود مساوية للشغل المبذول من المجال الكهربائي لإيقافها. ويمكن التعبير عن ذلك بالمعادلة التالية:

$$KE = -e\Delta V_0$$

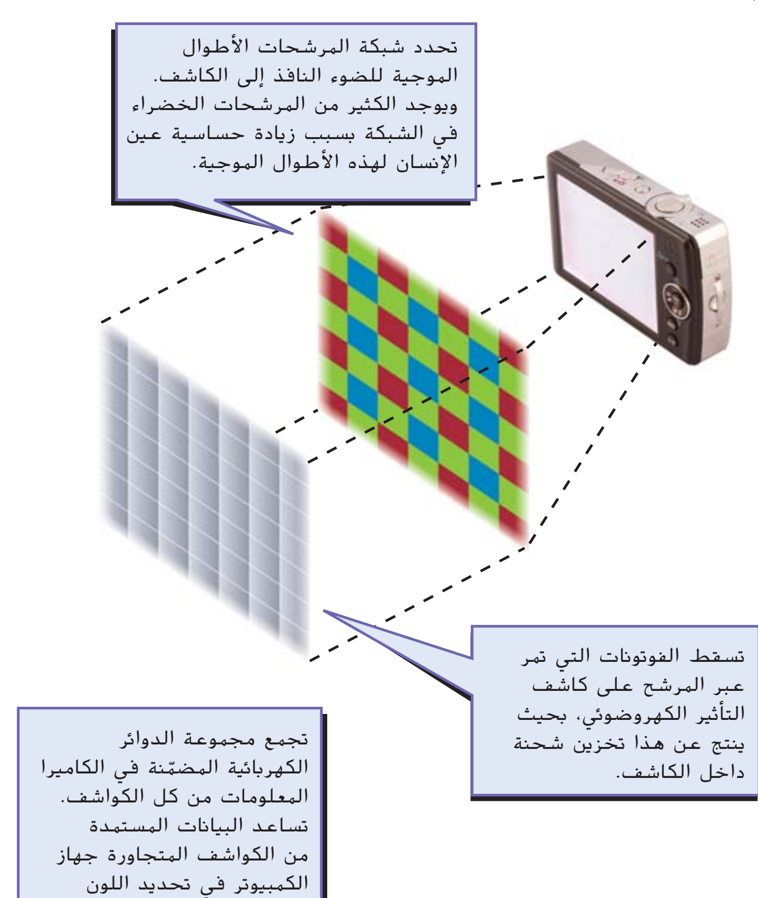
حيث يمثّل ΔV_0 فرق جهد الإيقاف بوحدة الفولت (J/C). ويمثّل e شحنة الإلكترون (-1.602×10^{-19} C). لاحظ أنّ الإشارة السالبة في المعادلة، والمقدار السالب للشحنة q ينتجان مقدارًا موجبًا لطاقة الحركة *KE*. وأن حسابات الطاقة الحركية للإلكترونات بناءً على هذه التجربة تدعم نظرية الفوتون لأينشتاين.

تطبيق التأثير الكهروضوئي إذا كنت قد استخدمت كاميرا رقمية من قبل، فإنَّك قد استخدمت جهازًا يستفيد من التأثير الكهروضوئي. فالكاميرا الرقمية كالموضحة في **الشكل 8** تستخدم شبكة من كاشفات التأثير الكهروضوئي الدقيقة، حيث يتجمع الملايين منها في بضعة سنتيمترات مربعة. وهي مصممة بحيث يدخل الضوء إليها من خلال العدسة ويمرّ عبر شبكة من المرشحات الموضوعة فوق كاشفات التأثير الكهروضوئي. تسمح المرشحات بمرور أطوال موجية محددة من الضوء، تتوافق مع ألوان معينة من الضوء، لتصل إلى كاشف مفرد. وعندما تسقط الفوتونات على المستشعر يتم تخزين إلكترونات ضوئية في الكاشف. تشير كمية الشحنة المخزّنة في موقع الكاشف إلى مدى سطوع الضوء، وتتجمع المعلومات من شبكة الكواشف بأكملها لإعادة تكوين الصورة. وبسبب أن الإلكترونات الضوئية تولّد جهدًا داخل الكواشف، فإنَّ العملية تختلف عن التأثير الكهروضوئي وتسمى بالتأثير الضوئي الجهدي.



الشكل 7 يتحكّم مقياس الجهد في فرق الجهد داخل الخلية الضوئية. ومن خلال ضبط مقياس الجهد بدقة، يمكنك تحديد الجهد الذي ينتج عنه تيار صفري. تُخفق كل الإلكترونات في الوصول إلى الأنود عند عتبة التيار الصفري، بل تسقط بدلًا من ذلك على الكاثود بسبب القوة الناتجة عن المجال الكهربائي بين الكاثود والأنود.

الشكل 8 يعتمد كاشف صورة الكاميرا الرقمية على التأثير الكهروضوئي لتوليد الجهد.



مثال 1

الطاقة الحركية للإلكترون الضوئي يبلغ فرق جهد الإيقاف لخلية ضوئية معينة 4.0 V. ما مقدار الطاقة الحركية التي ينقلها الضوء الساقط إلى الإلكترونات؟ أوجد الإجابة بوحدتي الجول والإلكترون فولت.

1 تحليل المسألة

ارسم الكاثود والأنود والإشعاع الساقط واتجاه الإلكترون المنبعث. لاحظ أنَّ جهد الإيقاف يمنع الإلكترونات من التدفق عبر الخلية الضوئية.

المعلوم	المجهول
$\Delta V = 4.0\ V$	$KE = ?$ (بوحدتي J و eV)
$e = -1.602 \times 10^{-19}\ C$	

2 حساب المجهول

يبذل المجال الكهربائي شغلًا على الإلكترونات، لذا تساوي الطاقة الحركية النهائية للإلكترون الطاقة الحركية الابتدائية بالإضافة إلى الشغل المبذول على الإلكترون.

$$KE_{النهائية} = KE_{الابتدائية} + W_{المجال الكهربائي على الإلكترون}$$

$$0\ J = KE_{الابتدائية} + W_{المجال الكهربائي على الإلكترون}$$

◀ بما أنَّ فرق الجهد المستخدم هو جهد الإيقاف، إذًا $KE_{النهائية} = 0\ J$.

أوجد $KE_{الابتدائية}$.

$$KE_{الابتدائية} = -W_{المجال الكهربائي على الإلكترون}$$

$$= -e\Delta V_0$$

◀ استخدم تعريف فرق الجهد الكهربائي. $\left(\Delta V = \frac{W_{على الإلكترون}}{e}\right)$ لإيجاد $W_{على الإلكترون} = e\Delta V$.

$$= -(-1.602 \times 10^{-19}\ C)(4.0\ V)$$

$$= +6.4 \times 10^{-19}\ J$$

◀ عوض عن $e = -1.602 \times 10^{-19}\ C,\ \Delta V_0 = 4.0\ V$

حوّل KE من الجول إلى الإلكترون فولت.

$$KE = (6.4 \times 10^{-19}\ J)\frac{1\ eV}{1.602 \times 10^{-19}\ J}$$

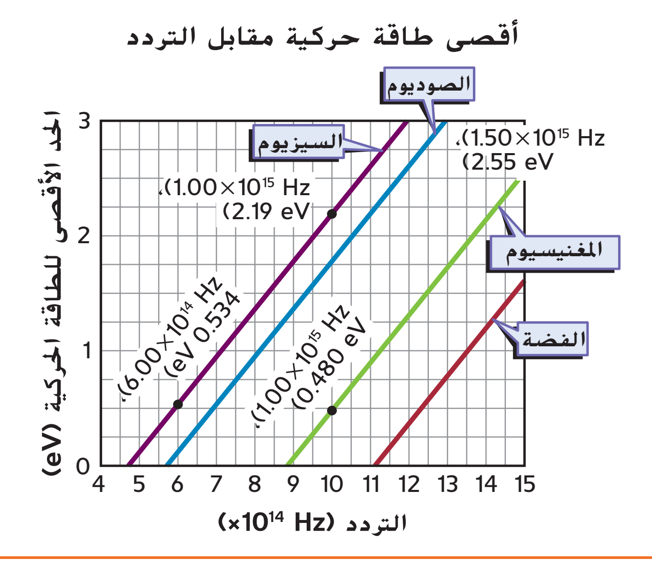
$$= 4.0\ eV$$

3 تقييم الإجابة

- **هل الوحدات صحيحة؟** تُعدّ وحدتا الجول والإلكترون فولت من وحدات الطاقة.
- **هل الإشارة منطقية؟** دائمًا ما تكون الطاقة الحركية موجبة.
- **هل المقدار منطقي؟** إلكترون فولت واحد يساوي طاقة إلكترون متسارع بتأثير فرق جهد مقداره 1 V. ولأنّ الإلكترون يتسارع متأثرًا بفرق جهد قدره 4 V. إذًا تُعدّ 4 eV إجابة منطقية.

تطبيقات

5. طاقة أحد الإلكترونات تساوي 2.3 eV. ما مقدار الطاقة الحركية للإلكترون بالجول؟
6. ما السرعة المتجهة للإلكترون في المسألة السابقة؟
7. ما مقدار الطاقة الحركية بوحدة eV لإلكترون مقدار سرعته المتجهة $6.2 \times 10^6\ m/s$؟
8. يبلغ مقدار جهد الإيقاف في خلية كهروضوئية 5.7 V. احسب أعلى طاقة حركية للإلكترون الضوئي المنبعث بوحدة eV.
9. يبلغ فرق جهد الإيقاف في خلية كهروضوئية 5.1 V. ما مقدار الطاقة الحركية التي ينقلها الضوء الساقط إلى الإلكترونات بالجول؟
10. يبلغ مقدار أعلى طاقة حركية للإلكترونات الضوئية المنبعثة في خلية كهروضوئية $7.5 \times 10^{-19}\ J$. ما مقدار جهد الإيقاف؟
11. **تحفيز** يبلغ جهد الايقاف اللازم لمنع التيار في خلية ضوئية 3.2 V. احسب أعلى طاقة حركية للإلكترونات الضوئية بالجول أثناء انبعاثها.



الجدول 1 تردد العتبة، والطول الموجي عند العتبة، ودالة الشغل المبذول من الفلز.

الفلز	تردد العتبة ($\times 10^{14}$ Hz)	الطول الموجي العتبة (nm)	دالة الشغل (eV)
السيزيوم	4.70	637	1.95
المغنيسيوم	8.84	339	3.66
الفضة	11.1	270	4.6
الصوديوم	5.70	526	2.36

الشكل 9 تردد العتبة للفلز يساوي تقاطع المستقيم مع المحور x. بينما يساوي ميل كل مستقيم ثابت بلانك.

قياس h التمثيل البياني الموضح لطاقات حركة الإلكترونات المتحررة من فلز مقابل ترددات الفوتونات الساقطة عبارة عن خط مستقيم، كما يبين **الشكل 9**. وللفلزات جميعها تمثيلات بيانية متشابهة لها الميل نفسه، وهذا الميل يعبر عن النسبة بين ارتفاع الخط المستقيم وامتداده الأفقي، والذي يساوي ثابت بلانك h.

تختلف التمثيلات البيانية في تردد العتبة اللازم لتحرير الإلكترونات فقط. في **الشكل 9**، تردد العتبة (f_0) هو النقطة التي تكون عندها $KE = 0$. وبالرجوع إلى التمثيل البياني، نلاحظ أنَّ f_0 تقع عند نقطة تقاطع الخط المستقيم مع المحور x. وعلى سبيل المثال أيضًا، يتقاطع المستقيم مع المحور x لمادة السيزيوم عند 4.70×10^{14} Hz. وتمثل هذه القيمة تردد العتبة للسيزيوم وللفوتون الذي له هذا التردد طاقة تكفي لتحرير إلكترون واحد فقط من الفلزّ. يُعرف هذا الحد الأدنى من الطاقة باسم **دالة الشغل** أو اقتران الشغل للفلز، واقتران الشغل أو دالة الشغل يُعرف بانه مقدار الطاقة اللازم لتحرير أضعف الإلكترونات ارتباطًا بالنواة من الفلز. يساوي مقدار دالة الشغل hf_0. وعندما يسقط فوتون بتردد قدره f_0 على الفلز، تكون طاقة الفوتون كافية لتحرير الإلكترون إلا أنها لا تكفي لتزويد الإلكترون بأي طاقة حركية.

ربط الرياضيات بالفيزياء

ميل المستقيم إنّ المستقيمات في **الشكل 9** متوازية، ما يعني أنَّ كل المستقيمات لها الميل نفسه. في ما يلي حسابات السيزيوم والمغنيسيوم.

الرياضيات	الفيزياء	
	السيزيوم	المغنيسيوم
(x_1, y_1), (x_2, y_2)	$(6.00 \times 10^{14}\text{ Hz}, 0.534\text{ eV})$, $(1.00 \times 10^{15}\text{ Hz}, 2.19\text{ eV})$	$(1.00 \times 10^{15}\text{ Hz}, 0.480\text{ eV})$, $(1.50 \times 10^{15}\text{ Hz}, 2.55\text{ eV})$
$m = \frac{y_2 - y_1}{x_2 - x_1}$	$m = \frac{2.19\text{ eV} - 0.534\text{ eV}}{1.00{\times}10^{15}\text{ Hz} - 6.00{\times}10^{14}\text{ Hz}}$	$m = \frac{2.55\text{ eV} - 0.480\text{ eV}}{1.50{\times}10^{15}\text{ Hz} - 1.00{\times}10^{15}\text{ Hz}}$
	$m = 4.14 \times 10^{-15}\text{ eV/Hz}$	$m = 4.14 \times 10^{-15}\text{ eV/Hz}$

يبلغ مقدار الميل لكل المستقيمات في الشكل 9 4.14×10^{-15} eV/Hz. عند تحويل هذه القيمة إلى J/Hz، فإنّها تساوي القيمة المعروفة لثابت بلانك:

$$4.14 \times 10^{-15}\,\frac{\text{eV}}{\text{Hz}}\left(\frac{1.602 \times 10^{-19}\text{ J}}{1\text{ eV}}\right) = 6.63 \times 10^{-34}\text{ J/Hz}$$

مثال 2

دالة الشغل والطاقة يُستخدم في خلية ضوئية معينة كاثود من الصوديوم. يبلغ طول موجة العتبة للصوديوم 526 nm.

a. أوجد دالة الشغل للصوديوم بوحدة eV.

b. إذا سقطت أشعة فوق بنفسجية بطول موجي قدره 348 nm على الصوديوم. فهل سيفرغ الكاثود الإلكترونات؟ إذا كان الأمر كذلك، فما الحد الأقصى من الطاقة الحركية للإلكترونات المنبعثة بوحدة eV؟

كاثود
أنود
ضوء ساقط
λ
+
−



ارسم الكاثود والأنود والإشعاع الساقط واتجاه الإلكترون المنبعث.

المعلوم	المجهول
$\lambda = 348$ nm $\lambda_0 = 526$ nm	$W = ?$ $KE = ?$
$hc = 1240$ eV·nm	



a. أوجد دالة الشغل باستخدام ثابت بلانك وطول موجة العتبة.

$$W = hf_0 = \frac{hc}{\lambda_0}$$

$$= \frac{1240 \text{ eV·nm}}{526 \text{ nm}}$$ ◄ عوض عن $hc = 1240$ eV·nm, $\lambda_0 = 526$ nm

$$= 2.36 \text{ eV}$$

b. استخدم العلاقة بين طاقة الفوتون والطول الموجي لإيجاد طاقة الفوتون.

$$E = \frac{1240 \text{ eV·nm}}{\lambda}$$

$$= \frac{1240 \text{ eV·nm}}{348 \text{ nm}}$$ ◄ عوض عن $\lambda = 348$ nm

$$= 3.56 \text{ eV}$$

لحساب الطاقة الحركية للإلكترون المنبعث، اطرح دالة الشغل من طاقة الإشعاع الساقط.

$$KE = hf - hf_0 = \frac{hc}{\lambda} - \frac{hc}{\lambda_0}$$

$$= E - W$$ ◄ عوض عن $E = \frac{hc}{\lambda}, W = \frac{hc}{\lambda_0}$

$$= 3.56 \text{ eV} - 2.36 \text{ eV}$$ ◄ عوض عن $E = 3.56$ eV, $W = 2.36$ eV.

$$= 1.20 \text{ eV}$$

3 تقييم الإجابة

- **هل الوحدات صحيحة؟** إن إجراء التحليل البعدي يؤكّد أن الإلكترون فولت هو الوحدة الصحيحة للطاقة الحركية.
- **هل الإشارة منطقية؟** دائمًا ما تكون الطاقة الحركية موجبة.
- **هل المقادير منطقية؟** تمثّل دالات الشغل المحددة في **الجدول 1** وحدات إلكترون فولت قليلة. لذا فإنّ القيمة منطقية.

تطبيقات

12. إذا كان طول موجة العتبة للزنك 310 nm. أوجد تردد العتبة للزنك بوحدة Hz. ودالة الشغل بوحدة eV.

13. إذا كانت دالة الشغل للسيزيوم 1.95 eV. فما الطاقة الحركية القصوى، بوحدة eV، للإلكترونات الضوئية المنبعثة عندما يسقط الضوء البنفسجي بطول موجي 425 nm على السيزيوم؟

14. عند تسليط إشعاع فوق بنفسجي طوله الموجي 193 nm على فلز. تنبعث الإلكترونات بطاقة حركية مقدارها 3.5 eV. ما دالة الشغل للفلز؟

15. **تحفيز** سلط باحث ضوءًا على فلز واكتشف أنّ أكبر طول موجي يسبب تحرير الإلكترونات من الفلز هو 273 nm. استخدم **الجدول 1** لتحديد الفلز.

تأثير كومبتون

يوضّح التأثير الكهروضوئي أنّ الفوتون له طاقة حركية حتى وإن لم تكن له كتلة.
وتوقع أينشتاين في العام 1916 أنَّ الفوتون يجب أن يكون له خاصية جُسيمية أخرى، وهي كمية التحرك (الزخم). كما زعم أنَّ كمية تحرك الفوتون أو زخمه يجب أنْ تساوي $\frac{E}{c}$.
وبما أنَّ
$E = hf$ و $\frac{f}{c} = \frac{1}{\lambda}$. فيمكن حساب كمية حركة الفوتون بالمعادلة التالية:

كمية تحرك الفوتون (زخم الفوتون)
تساوي كمية حركة الفوتون ثابت بلانك مقسومًا على الطول الموجي للفوتون.

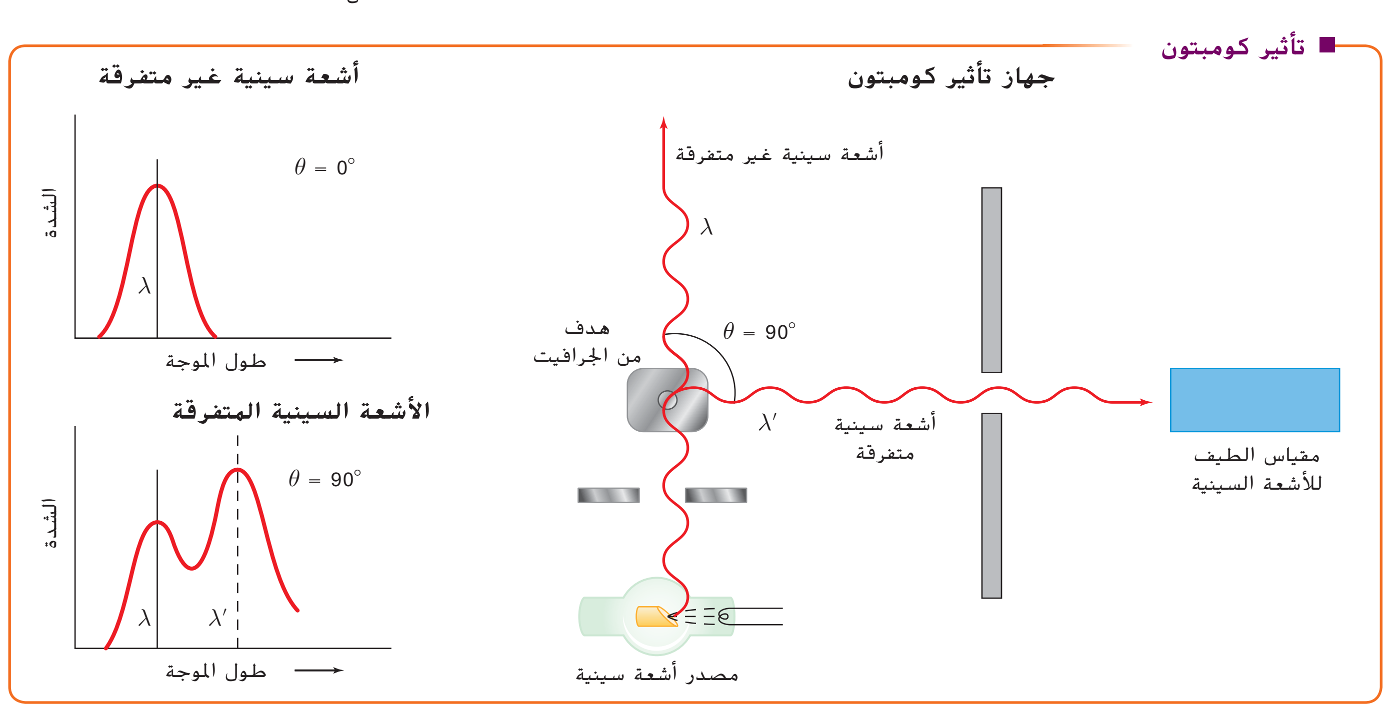
$$p = \frac{hf}{c} = \frac{h}{\lambda}$$

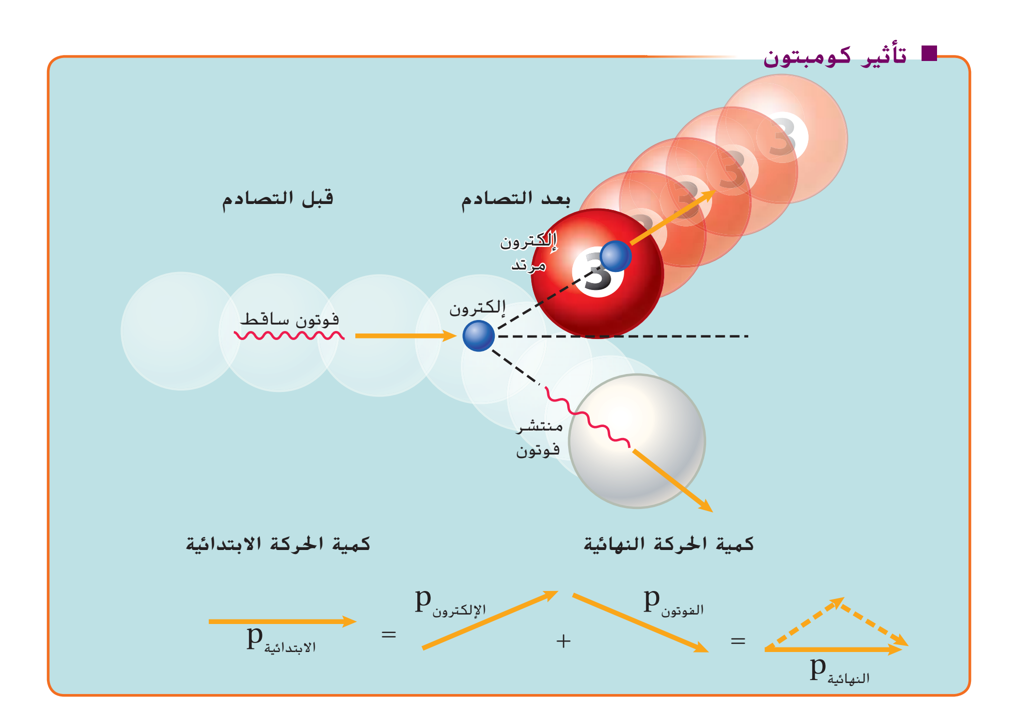
اختبرت التجارب التي أجراها عالم الفيزياء الأمريكي، أرثر هولي كومبتون، عام 1922 فرضية أينشتاين. وأكّدت نتائج كومبتون دعمها للنموذج الجُسيمي للضوء. وجّه كومبتون أشعة سينية بطول موجي معروف نحو هدف من الجرافيت، كما هو موضّح في **الشكل 10**، ثم قاس الأطوال الموجية للأشعة السينية التي شتّتها الهدف. لاحظَ كومبتون أنَّ بعض الأشعة السينية تشتت بدون تغيّر في الطول الموجي، في حين كان الطول الموجي لبعضها الآخر أطول منه في الإشعاع الأصلي. وهذه النتائج موضّحة في الجانب الأيمن في **الشكل 10**. لاحظ أنَّ الطول الموجي لذروة الاشعاع للأشعة السينية غير المتفرقة تتوافق مع الطول الموجي للأشعة السينية الأصلية الساقطة. في حين كان الطول الموجي عند ذروة شدة الأشعة السينية المشتتة للأشعة السينية أكبر من الطول الموجي للأشعة السينية الأصلية الساقطة.

عرفت سابقًا أنَّ معادلة طاقة الفوتون هي $E = hf$. ويمكن كتابتها أيضًا بالصورة $E = \frac{hc}{\lambda}$. ويتضح من المعادلة أنَّ طاقة الفوتون تتناسب عكسيًا مع طوله الموجي. وبالتالي فإنّ الزيادة في الطول الموجي التي لاحظها كومبتون تعني أنَّ فوتونات الأشعة السينية فقدت كلًا من الطاقة وكمية الحركة. يُطلق على الإزاحة في الطول الموجي للفوتونات المشتتة اسم **تأثير كومبتون**. وهذه الإزاحة في الطول الموجي، صغيرة جدًا، وتساوي حوالي 10^{-3} nm فقط. ويكون التأثير قابلًا للقياس فقط عندما يكون الطول الموجي للأشعة السينية يساوي أو أقل من 10^{-2} nm.

الشكل 10 يشير تغيّر ذروة الطول الموجي للأشعة السينية المشتتة إلى أنَّ الفوتونات المشتتة فقدت طاقة وزخمًا.

اشرح لماذا تُشير زيادة الطول الموجي إلى انخفاض الطاقة.





الشكل 11 يُطبق قانون بقاء الطاقة وكمية الحركة (الزخم) على التصادم بين كرات البلياردو وكذلك التصادم بين الفوتون والجُسيمات.

الفوتونات وحفظ الطاقة وكمية الحركة لاحظ كومبتون في التجارب الأخيرة انبعاث الإلكترونات من كتلة الجرافيت أثناء التجربة. كما اقترحَ أنّ فوتونات الأشعة السينية اصطدمت بالإلكترونات داخل هدف الجرافيت ونقلت إليها الطاقة وكمية الحركة. اعتقد كومبتون أنّ التصادم بين الفوتون والإلكترون يُشبه التصادم المرن الذي يحدث بين كرات البلياردو، كما هو موضّح في **الشكل 11**. واختبر هذه الفكرة من خلال قياس طاقات الإلكترونات المنبعثة من كتلة الجرافيت. اكتشف كومبتون أنَّ الطاقة وكمية الحركة التي اكتسبتها الإلكترونات المنبعثة تساوي الطاقة وكمية الحركة التي فقدتها الفوتونات. بالتالي، تخضع الفوتونات لقانون حفظ الطاقة وكمية الحركة عند اصطدامها بجُسيمات أخرى.

القسم 1 مراجعة

16. **الفكرة الرئيسة** لماذا لا يتمكن الضوء عالي الشِدّة منخفض التردد من تحرير الإلكترونات من الفلز، في حين يتمكن الضوء منخفض الشِدّة عالي التردد من ذلك؟

17. **تردد الإشعاع من الأجسام الساخنة وطاقته** عند ازدياد درجة حرارة الجسم، ما التغيّر الذي يطرأ على التردد المقابل لأعلى شدة؟ وما التغيّر الذي يطرأ على المقدار الكلي للطاقة المنبعثة من الجسم؟

18. **التأثير الكهروضوئي وتأثير كومبتون** ميّز بين التأثير الكهروضوئي وتأثير كومبتون.

19. **التأثير الكهروضوئي وتأثير كومبتون** سلّط باحث أشعة سينية على هدف ما. فانبعث إلكترون واحد من الهدف ولم ينبعث أي إشعاع آخر. اشرح ما إذا كان حدوث ذلك نتيجة التأثير الكهروضوئي أم تأثير كومبتون؟

20. **التأثير الكهروضوئي** سقط ضوء أخضر (λ = 532 nm) على فلز مجهول، ما أدّى إلى تحرير الإلكترونات. إذا تم إيقاف الإلكترونات المنبعثة باستخدام جهد مقداره 1.44 V، ما مقدار دالة الشغل للفلز بوحدة eV؟

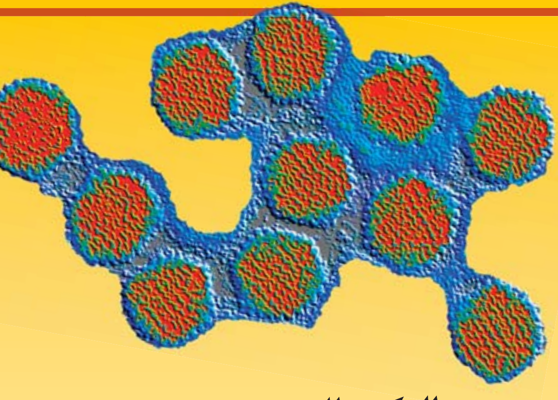
21. **طاقة الفوتون** ما مقدار طاقة الفوتون، بوحدة eV، الناتج عن مؤشر ليزر طوله الموجي 650 nm؟

22. **تأثير كومبتون** تسقط الأشعة السينية على عظمة تصطدم بإلكترون فيها فتشتت. ما وجه المقارنة بين الطول الموجي للأشعة السينية المتفرقة والطول الموجي للأشعة السينية الساقطة؟

23. **التأثير الكهروضوئي** تمتص عظمة أشعة سينية ويتحرر منها إلكترون. إذا كان الطول الموجي للأشعة السينية 0.02 nm تقريبًا، فقدّر طاقة الإلكترون بوحدة eV. افترض إهمال دالة الشغل للعظمة مقارنة بطاقة الأشعة السينية.

24. **التفكير الناقد** تخيّل أنَّ تصادم كرتي البلياردو يمثل التفاعل الذي يتم بين الفوتون والإلكترون أثناء تأثير كومبتون. وافترض أنَّه تم استبدال الإلكترون ببروتون كتلته أكبر بكثير من كتلة الإلكترون- هل سيكتسب هذا البروتون مقدار الطاقة نفسه الذي يكتسبه الإلكترون من التصادم؟ وهل تكون الطاقة التي يفقدها الفوتون مساوية لتلك الطاقة التي يفقدها عند التصادم بالإلكترون؟

القسم 2 موجات المادة



الفكرة الرئيسة

تتمتع الجسيمات المتحركة بخصائص موجية.

الأسئلة الرئيسة

- ما الدليل على الطبيعة الموجية للمادة؟
- ما الطبيعة المزدوجة للموجات والجسيمات، وما مدى أهمية مبدأ عدم التحديد لهايزنبيرغ؟

مراجعة المفردات

الأشعة السينية x-ray : موجة كهرومغناطيسية عالية التردد منبعثة عن إلكترونات شديدة التسارع

مفردات جديدة

طول موجة دي برولي
de Broglie wavelength
مبدأ عدم التحديد لهايزنبيرغ
heisenberg uncertainty principle
المجهر الإلكتروني الماسح
Transmission Electron Microscope (TEM)

الفيزياء في حياتك

يكون المجهر الإلكتروني الماسح (TEM) صورًا للأجسام صغيرة الحجم مثل الذرة من خلال الكشف عن مقدار حيد الإلكترونات التي يتم إرسالها عبر العينة. ويرتبط الحيود عادةً بالموجات، لذلك، لكي تعمل المجاهر الإلكترونية الماسحة، يجب أن تمتلك الإلكترونات خصائص موجية.

موجات دي برولي

إذا كان للموجات الكهرومغناطيسية خصائص جسيمية، فهل يمكن أن يُظهر الجسيم تداخلًا وحيودًا كما تفعل الموجة؟ في عام 1923، طرح عالم الفيزياء الفرنسي دي برولي أنّه يمكن وصف الجسيم المادي بطول موجي وكان هذا الطرح بمثابة توسع كبير لنظرية الفوتون التي وضعها أينشتاين. كما أنَّ أينشتاين كان من أول المؤيدين لموجات دي برولي.

عرفت سابقًا أن كمية تحرك(زخم) الجسم تساوي كتلة الجسم مضروبةً في سرعته المتجهة، $p = mv$. وإذا كان الجسيم ذو الكتلة يتصرف كالموجة، فإنَّ كمية تحركه يجب أن تكون مثل كمية تحرك الفوتون، $p = \frac{h}{\lambda}$. طرح دي برولي إمكانية المساواة بين المعادلتين:

$$p = mv = \frac{h}{\lambda}$$

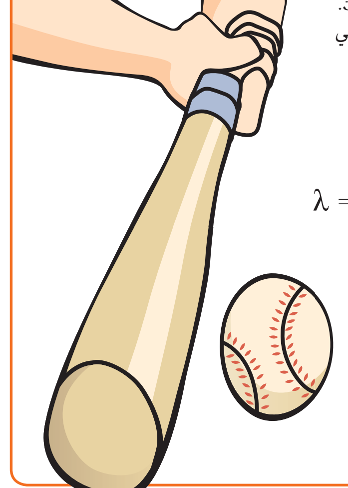
يمثّل الطول الموجي λ في العلاقة السابقة الطول الموجي للجسيم المتحرّك، ويُعرف باسم **طول موجة** دي برولي. ويمكن حساب طول موجة دي برولي من المعادلة التالية:

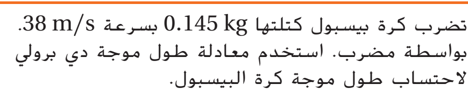
طول موجة دي برولي

طول موجة دي برولي للجسيم المتحرّك يساوي ثابت بلانك مقسومًا على كمية حركة الجسيم.

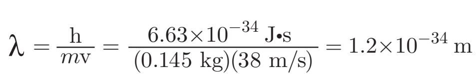
$$\lambda = \frac{h}{p} = \frac{h}{mv}$$

وبناءً على نظرية دي برولي، يجب أنْ يُظهر الجسيم الدقيق مثل الإلكترون أو البروتون خصائص موجية. في العام 1927، أجريت تجارب أثبتت حيود الإلكترون كالضوء تمامًا، وهو ما يُعدّ دليلًا على الخصائص الموجية للإلكترون. إلا أن الأجسام التي تستخدمها في حياتك اليومية لا تظهر خصائص موجية، لأنّ طولها الموجي متناهي الصغر لدرجة أنّه لا تمكن ملاحظته، كما هو موضّح في **الشكل 12**.





تضرب كرة بيسبول كتلتها 0.145 kg بسرعة 38 m/s بواسطة مضرب. استخدم معادلة طول موجة دي برولي لاحتساب طول موجة كرة البيسبول.



$$\lambda = \frac{h}{mv} = \frac{6.63\times10^{-34}\ \text{J·s}}{(0.145\ \text{kg})(38\ \text{m/s})} = 1.2\times10^{-34}\ \text{m}$$

الشكل 12 إنّ الطول الموجي للأجسام المستخدمة في الحياة اليومية قصير للغاية لدرجة أنّه لا تمكن ملاحظته.

اشرح كيف يمكن أن يتغيّر الطول الموجي لكرة البيسبول إذا تحركت الكرة بشكل أسرع؟

مثال 3

طول موجة دي برولي يتسارع إلكترون تحت تأثير فرق جهد مقداره 75 V. فما طول موجة دي برولي له؟

1 تحليل المسألة ورسمها

ارسم القطبين الموجب والسالب.

المعلوم

$\Delta V = 75\ \text{V}$ $\quad m_e = 9.11\times10^{-31}\ \text{kg}$

$e = -1.602\times10^{-19}\ \text{C}$ $\quad h = 6.63\times10^{-34}\ \text{J·s}$

المجهول

$\lambda = ?$

2 حساب المجهول

اكتب علاقة طاقة حركة الإلكترون التي تعتمد على فرق الجهد، وعلاقة طاقة الحركة بدلالة الحركة، واستخدمهما لحساب السرعة المتجهة للإلكترون.

$KE = -e\Delta V$ و $KE = \frac{1}{2}mv^2$

$\frac{1}{2}mv^2 = -e\Delta V$ ◄ بتساوي معادلتي طاقة الحركة.

أوجد قيمة v.

$v = \sqrt{\frac{-2e\Delta V}{m}}$

$= \sqrt{\frac{-2(-1.602\times10^{-19}\ \text{C})(75\ \text{V})}{9.11\times10^{-31}\ \text{kg}}}$ ◄ بالتعويض عن $e = -1.602\times10^{-19}\ \text{C},\ \Delta V = 75\ \text{V},\ m_e = 9.11\times10^{-31}\ \text{kg}$

$= 5.1\times10^{6}\ \text{m/s}$

استخدم العلاقة بين الكتلة والسرعة المتجهة وكمية التحرك.

$p = mv$

$= (9.11\times10^{-31}\ \text{kg})(5.1\times10^{6}\ \text{m/s})$ ◄ بالتعويض عن $m_e = 9.11\times10^{-31}\ \text{kg},\ v = 5.1\times10^{6}\ \text{m/s}$

$= 4.6\times10^{-24}\ \text{kg·m/s}$

استخدم العلاقة بين كمية التحرك وطول موجة دي برولي.

$\lambda = \frac{h}{p}$

$= \frac{6.63\times10^{-34}\ \text{J·s}}{4.6\times10^{-24}\ \text{kg·m/s}}$ ◄ بالتعويض عن $h = 6.63\times10^{-34}\ \text{J/s},\ p = 4.6\times10^{-24}\ \text{kg·m/s}$

$= 1.4\times10^{-10}\ \text{m}$. وهذا يساوي 0.14 nm

3 تقييم الإجابة

- **هل الوحدات صحيحة؟** يؤكّد التحليل البُعدي للوحدات أنَّ m/s وحدة v وnm وحدة λ.
- **هل الإشارة منطقية؟** من المتوقع إيجاد قيم موجبة لكل من v وλ.
- **هل المقادير منطقية؟** يقترب الطول الموجي من 0.1 nm. وهو في نطاق الأشعة السينية من الطيف الكهرومغناطيسي.

تطبيقات

25. إذا تسارع إلكترون تحت تأثير فرق جهد مقداره 250 V. فما طول موجة دي برولي المصاحبة له؟ وما سرعته؟

26. تتدحرج كرة بولينج كتلتها 7.0 kg بسرعة متجهة قدرها 8.5 m/s.

a. ما طول موجة دي برولي لكرة البولينج؟

b. لماذا لا يظهر على كرة البولينج سلوك موجي ملحوظ؟

27. ما فرق الجهد اللازم لتسارع إلكترون بحيث يبلغ طوله الموجي 0.125 nm؟

28. **تحفيز** يبلغ طول موجة دي برولي 0.14 nm للإلكترون المذكور في المثال 3. ما مقدار الطاقة الحركية بوحدة eV للبروتون الذي له الطول الموجي نفسه؟

الموقع وكمية الحركة

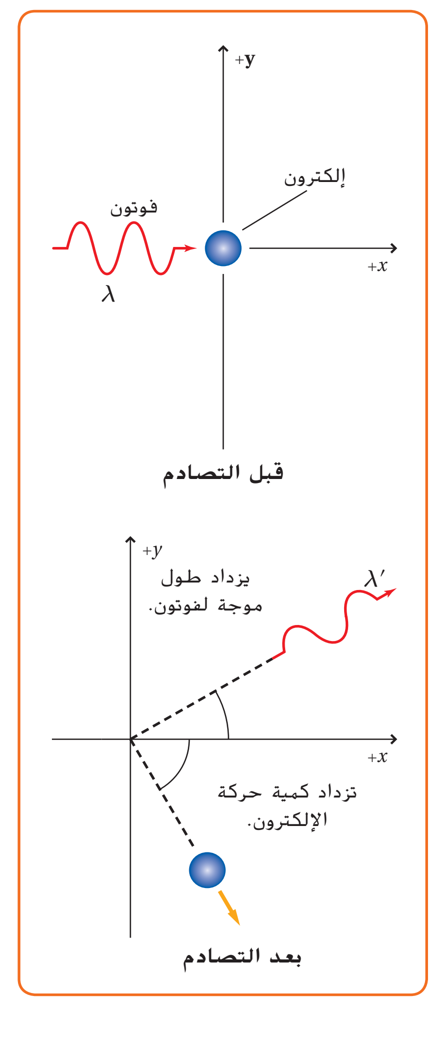
أدّت نظرية دي برولي للخصائص الموجية للجُسيمات إلى تغيير جذري في مدى فهمنا للأجسام الدقيقة بحجم الذرة. ولكي تحدد خصائص جسم، من المنطق أن تعتقد أن بإمكان إجراء تجربة تقيس فيها مباشرةً الخصائص المطلوبة. على سبيل المثال، إذا أردت قياس موقع كرة أثناء السقوط الحرّ، قد تُجرب أولًا استخدام العصا المترية وساعة التوقيت لإجراء القياسات. وإذا كنت ترغب في إجراء قياس أكثر دقة، قد تفكر باستخدام كاميرا فيديو وآلة حاسبة أو جهاز كمبيوتر، وإذا أردت المزيد من الدقة ستستخدم أدوات أكثر تطورًا. في الحقيقة، لا تضع الفيزياء الكلاسيكية حدًا لدقة القياس. إلا أنّ نظرية دي برولي الجديدة للموجات المادية أجبرت علماء الفيزياء على وضع حدود القياس.

مبدأ عدم اليقين لهايزنبيرغ فكّر في قياس موقع جُسيم ذري من خلال تسليط الضوء عليه ثم جمع الضوء المنعكس من خلال أحد أجهزة القياس. وبسبب الحيود فإن الضوء المستخدم في تحديد موقع الجسيم ينتشر، مما يجعل تحديد موقع الجُسيم بشكل دقيق أمرًا مستحيلًا. ولكي تحصل على قياسات أكثر دقة، ينبغي استخدام إشعاع ذي طول موجي قصير، حيث يقلل من درجة الحيود ومن نسبة عدم التحديد.

نتيجة تأثير كومبتون، عندما يصطدم الإشعاع ذو الطول الموجي القصير وعالي الطاقة بجسيم، تتغيّر كمية تحرك الجُسيم كما هو موضّح في **الشكل 13**. وبناءً على ذلك، يكون لعملية قياس موقع الجُسيم أثر في تغيير كمية تحرك الجُسيم. كلما كان تحديد موقع الجُسيم أكثر دقة، زادت نسبة عدم التحديد بشأن كمية تحركه. وبالمثل، فعند معرفة كمية تحرك الجسيم بصورة دقيقة، تقل نسبة عدم التحديد بشأن موقع الجُسيم.

☑ **التأكد من فهم النص** **اشرح** لماذا يزيد قياس موقع الجُسيم باستخدام الإشعاع فائق الطاقة من نسبة عدم التحديد في كمية التحرك.

لخّص **مبدأ عدم اليقين لهايزنبيرغ** هذه الحالة حيث ينص على أنه من غير الممكن قياس موقع الجُسيم وكمية تحركة بدقة في آن واحد. إن هذا المبدأ، الذي سُمي نسبة إلى عالم الفيزياء الألماني فيرنر هايزنبيرغ، نتيجة الطبيعة المزدوجة للضوء والمادة. وبالرغم من أنّ آثار الحد لا تكون ملحوظة إلا عند قياس الجسيمات ذات الحجم الذري، أدى عمل هايزنبيرغ إلى تغيير جوهري في مدى فهمنا للعالم من حولنا. في حين أنّ نظريات نيوتن وماكسويل الكلاسيكية كانت نماذج ناجحة بالنسبة إلى الأجسام المستخدمة في حياتنا اليومية، إلا أنّ نظرية الكم ونماذجها ذات الطبيعة المزدوجة للضوء والمادة لا يزال يلزمها وصف الأجسام على المستوى الذري بدقة.



الشكل 13 من الضروري حدوث اصطدام بين الفوتون والإلكترون لقياس موقع الإلكترون. إذ يشتت هذا الاصطدام كلًا من الإلكترون والفوتون مما يؤدي إلى تغيير كمية تحرك كل منهما.

قارن بين الطول الموجي للفوتون قبل الاصطدام وبعده. إلامَ يُشير هذا التغيّر في الطول الموجي في ما يتعلق بطاقة الفوتون؟

القسم 2 مراجعة

.29 الفكرة الرئيسة تقدم نظرية دي برولي للموجات المادية طريقة لحساب الطول الموجي لكل الجسيمات المتحرّكة. اشرح سبب عدم وضوح الطبيعة الموجية للأجسام المستخدمة في حياتنا اليومية.

.30 طول موجة دي برولي تبلغ كتلة جسيم ألفا (نواة الهيليوم) 6.6×10^{-27} kg ويتحرّك بسرعة مقدارها 120 m/s. ما طول موجة دي برولي المصاحبة لجُسيم ألفا هذا؟

.31 طول موجة دي برولي ما طول موجة دي برولي المصاحبة لإلكترون يتسارع خلال فرق جهد مقداره 125 V؟

.32 التفكير الناقد عندما يمرّ الضوء أو حزمة من الذرات عبر شق مزدوج، يتكوّن نمط تداخل. وتحدث كلتا النتيجتين عندما تمر الفوتونات أو الذرات عبر الشق المزدوج في الوقت نفسه. كيف يشرح مبدأ عدم التحديد لهايزنبيرغ هذا الأمر؟

تجاوز الحدود!

شاشات اللمس التي تعمل بنظرية الكم

إذا اصطدمت بحائط اسمنتي، فأنت تعلم أنَّك لن تعبر من خلاله إلى الجانب الآخر. ولكن الأجسام التي بحجم الذرات والأصغر منها يمكن أن تمرّ خلال ما قد يبدو كحاجز لا يمكن تخطّيه. تسمى هذه الخاصية العجيبة للمادة بالنفق الكمّي ولها تطبيقات حقيقية، سواء عالية التكنولوجيا أو منخفضة التكنولوجيا.

السلوك شبه الجسيمي والسلوك شبه الموجي عندما يريد كهربائي توصيل سلكين من الألمنيوم، فإنَّ كل ما يحتاج إليه هو لفّ السلكين حول بعضهما. وهذا غير مجدٍ، حيث يُكوّن الألمنيوم طبقةً من أكسيد الألمنيوم التي تعمل كعازل. لو كانت الإلكترونات تتصرّف مثل الجسيمات دائمًا، فلا يمكن أن تمر أبدًا عبر هذا العازل. لكن لأنّ الإلكترونات أيضًا لها سلوك مشابه للموجات، فثمة احتمال ضعيف أن يتواجد الإلكترون خارج السلك. وإذا كان هناك سلك آخر قريب (كما في مثال الأسلاك الملفوفة)، فيمكن أن يمرّ الإلكترون من سلك إلى آخر عبر ما يبدو أنَّه حاجز غير قابل للاختراق. وبما أنّ هناك الكثير والكثير من الإلكترونات، يُترجَم هذا الاحتمال الضعيف لانتقال كل إلكترون مفرد خلال الحاجز إلى تيار قابل للقياس عبر الحاجز.

تحت الضغط ثمة مثال أكثر تعقيدًا للنفق الكمّي في التكنولوجيا الحديثة لشاشات اللمس أو لوحات المفاتيح الحساسة للضغط داخل هذه الأجهزة، حيث تُغطَّى جسيمات موصِّلة بحجم النانو بطبقة غير موصِّلة تعزلها عن بعضها ويكون ذلك في وضع الإيقاف. عند لمس الجهاز، تقترب الجسيمات من بعضها في مساحة قطرها عشرة نانومترات تقريبًا. وكلما زاد الضغط المؤثر عليها زاد اقتراب الجسيمات من بعضها.

ونظرًا إلى أنّ للجسيمات نتوءات، تتمكن نتوءات أحدها من الاقتراب جدًّا من نتوءات جسيم آخر، ما يؤدي إلى ازدياد في سرعة "المرور بالنفق" في محاذاة النتوءات. تُعدّ حركة الإلكترونات على طول هذه النتوءات تيارًا كهربائيًا. ولكنه ليس مفتاح وصل وقطع بسيطًا، فكلما زاد الضغط المؤثر، زاد التيار الكهربائي. مما يوفّر تحكمًا حساسًا للضغط يمكن الاستفادة منه بعدة طرق مختلفة.

تطبيقات جديدة يختلف هذا كثيرًا عن شاشة اللَّمس التقليدية والتي تكون في وضع التشغيل (ملموسة) أو في وضع الإيقاف (غير ملموسة). تُضيف هذه التكنولوجيا بُعدًا ثالثًا للشاشة، تقريبًا مثلما يوفّر الطرف المنزلق في آلة الترومبون الموسيقية مدى مستمرًا من النغمات الموسيقية. أصبح سحر ميكانيكا الكم عند أطراف أصابعك.

لمزيد من التعمق <<<

ابحث عن الأنواع الأخرى من التكنولوجيا التي تعمل بها شاشات اللمس. ما بعض الطرق التي قد تتميز بها شاشة اللمس ثلاثية الأبعاد هذه عمّا تقدمه شاشة اللمس التقليدية؟

الوحدة 9

دليل الدراسة

الفكرة الرئيسة يمكن أن يكون للموجات سلوك مشابه للجسيمات، كما يمكن أن يكون للجسيمات سلوك مشابه للموجات.

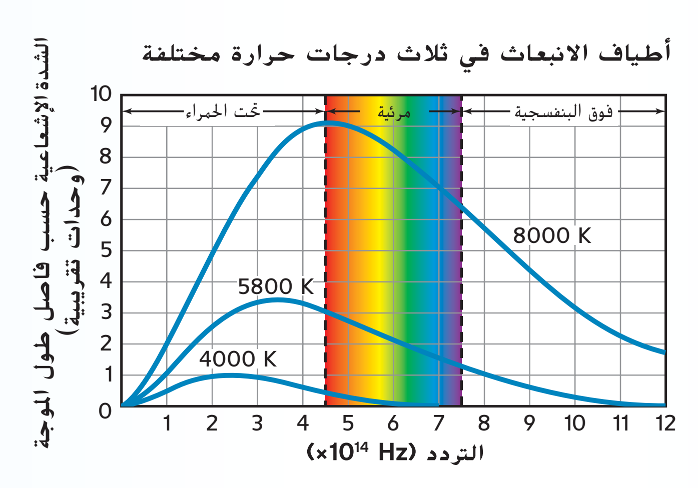
المفردات

- طيف الانبعاث emission spectrum
- مكمى quantized
- التأثير الكهروضوئي photoelectric effect
- تردد العتبة threshold frequency
- فوتون photon
- دالة الشغل work function
- تأثير كومبتون compton effect

القسم 1 النموذج الجسيمي للموجات

الفكرة الرئيسة يمكن أن يكون للضوء سلوك مشابه لجسيمات عديمة الكتلة تُسمى الفوتونات.

- يغطي الطيف المنبعث من الجسم مدى واسعًا من الأطوال الموجية. ويعتمد الطيف على درجة حرارة الجسم. شرح بلانك طيف الجسم من خلال افتراض أنَّ الجسيم يمكنه أن يمتص أو يبعث طاقات معينة فقط. وهذه الطاقات عبارة عن مضاعفات صحيحة لثابت معين، يسمى اليوم ثابت بلانك.



- إنّ التأثير الكهروضوئي هو انبعاث الإلكترونات من بعض الفلزات عندما تتعرض للإشعاع الكهرومغناطيسي. فسّر أينشتاين التأثير الكهروضوئي بافتراض أنَّ الضوء موجود في حزم من الطاقة تسمى بالفوتونات. وفي ما يلي توضيح للعلاقة بين طاقة الفوتون والتردد والطول الموجي.

$$E = hf = \frac{hc}{\lambda} = \frac{1240\ \text{eV}\cdot\text{nm}}{\lambda}$$

- يوضّح تأثير كومبتون أنَّ الفوتونات لها كمية حركة، كما تنبّأ أينشتاين. على الرغم من أنّ الفوتونات التي تتحرّك بسرعة الضوء عديمة الكتلة، إلا أنَّ لها طاقة وكمية حركة. ترتبط كل من كمية حركة الفوتون وتردده وطوله الموجي بالمعادلة التالية:

$$p = \frac{hf}{c} = \frac{h}{\lambda}$$

القسم 2 موجات المادة

الفكرة الرئيسة تتمتع الجسيمات المتحركة بخصائص موجية.

المفردات

- طول موجة دي برولي de Broglie wavelength
- مبدأ عدم اليقين لهايزنبيرغ heisenberg uncertainty principle

- اقترح دي برولي الطبيعة الموجية للجسيمات المادية وأُثبت ذلك بالتجربة من خلال حيود الإلكترونات عبر البلورات. كل الجسيمات المتحركة لها طول موجي يُعرف بطول موجة دي برولي. وتُستخدم المعادلة التالية في حساب طول موجة دي برولي للجسيم.

$$\lambda = \frac{h}{p} = \frac{h}{mv}$$

- تُعدّ الجوانب الجسيمية والموجية أجزاءً متممة للطبيعة المتكاملة لكل من المادة والضوء. ينص مبدأ عدم اليقين لهايزنبيرغ على أنّه لا يمكن قياس موضع جسيم من الضوء أو المادة وكمية حركة بدقة في الوقت ذاته.

الوحدة 9 التقويم

القسم 1 النموذج الجسيمي للموجات

إتقان المفاهيم

33. الضوء المتوهج يُستخدم مفتاح تحكم في ضبط توهج مصباح. ماذا يحدث للون الضوء المنبعث من المصباح إذا انخفض فرق الجهد المؤثر؟

34. وضح مفهوم الطاقة المكمّاة.

35. ما الكمية المكمّاة في تفسير ماكس بلانك للإشعاع المنبعث من الأجسام؟

36. الفكرة الرئيسة ماذا تسمى كمات الضوء؟

37. سلط ضوء تردده أعلى من تردد العتبة على مهبط في خلية ضوئية. كيف تُفسِّر نظرية التأثير الكهروضوئي لأينشتاين حقيقة تزايد التيار الإلكتروني الضوئي بزيادة شدة الضوء؟

38. وضح كيف فسّرت نظرية أينشتاين حقيقة أن الضوء الذي تردده أقل من تردد العتبة لفلز لا يحرر إلكترونات ضوئية منه، بغض النظر عن شدة الضوء.

39. الفيلم الفوتوغرافي كانت الكاميرات القديمة تُسجِّل الصور على فيلم. ونظرًا إلى أنّ بعض أنواع أفلام الأبيض والأسود كانت غير حساسة للضوء الأحمر، كان من الممكن تحميضها في حجرة مُظلِمة مُضاءة بالضوء الأحمر. كيف يُفسر نموذج الفوتون للضوء ذلك؟

40. كيف يوضّح تأثير كومبتون أنّ للفوتونات كمية تحرك وطاقة؟

إتقان حل المسائل

41. بناءً على نظرية بلانك كيف يتغير تردد اهتزاز ذرة إذا انبعثت منها طاقة مقدارها 5.44×10^{-19} J عند تغيّر قيمة n بمقدار 1؟

42. ما فرق الجهد اللازم لإيقاف إلكترونات أقصى طاقة حركة لها تُساوي 4.8×10^{-19} J؟

43. ما كمية حركة فوتون ضوء بنفسجي طوله الموجي يساوي 4.0×10^{2} nm؟

44. إذا كان تردد عتبة أحد الفلزات 3.00×10^{14} Hz. ما أقصى طاقة حركة للإلكترون الضوئي إذا سُلّط على الفلز ضوء طوله الموجي 6.50×10^{2} nm؟

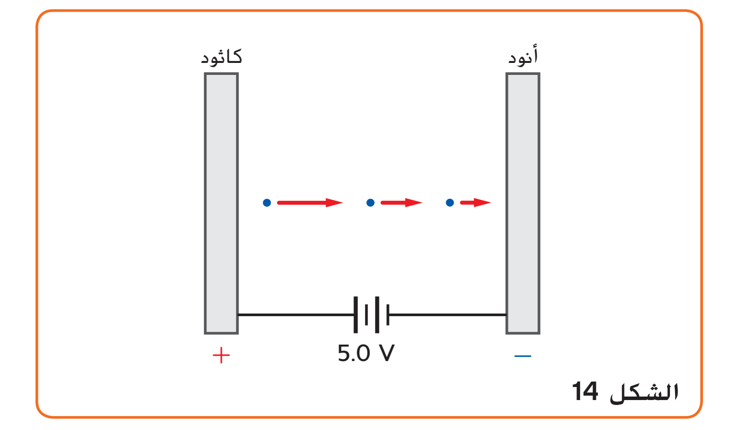
45. إذا كان تردد العتبة للصوديوم 4.4×10^{14} Hz. ما مقدار الشغل المبذول اللازم لتحرير إلكترون من سطح الصوديوم؟

46. إذا سقط ضوء تردده 1.00×10^{15} Hz على الصوديوم في المسألة السابقة، فما أقصى طاقة حركة للإلكترونات الضوئية؟

47. يوضِّح **الشكل 14** جهد الإيقاف لفلز معيّن. ما أقصى طاقة حركة للإلكترونات الضوئية بوحدات القياس التالية؟

a. الإلكترون فولت

b. الجول



الشكل 14

48. مقياس الضوء يستخدم مقياس الضوء لدى مصور الفوتوغرافي خلية ضوئية لقياس الضوء الساقط على الجسم المُراد تصويره. كم يجب أن تكون دالة الشغل للمهبط لكي تكون الخلية الضوئية حساسة للضوء الأحمر $(\lambda = 680 \text{ nm})$ كحساسيتها لألوان الضوء الأخرى؟

49. الطاقة الشمسية يستهلك منزل في احدى الدول حوالي 4×10^{11} J من الطاقة كل عام. إذا كانت أشعة الشمس تسقط على أجزاء هذه الدولة حوالي 3000 h من كل عام، بحيث يستقبل كل متر مربع من سطح الأرض في المتوسط حوالي 1000 J في الثانية (1000 W) من طاقة الشمس.

a. ما كمية الطاقة الشمسية الساقطة على متر مربع واحد كل عام؟

b. إذا كان من الممكن تحويل هذه الطاقة الشمسية إلى طاقة مفيدة بجودة تساوي 20 بالمائة، فما مساحة منطقة المحوّلات التي ستُنتج الطاقة اللازمة للمنزل؟

القسم 2 موجات المادة

إتقان المفاهيم

50. تقاس كمية التحرك لجسيم مادي بالمعادلة $p = mv$. هل يمكنك حساب كمية تحرك فوتون باستخدام المعادلة نفسها؟ فسر اجابتك.

51. اشرح كيف يمكن قياس كل من خصائص الإلكترون التالية:

a. الشحنة

b. الكتلة

c. الطول الموجي

52. اشرح كيف يمكن قياس كلٍ من خصائص الفوتون التالية:

a. الطاقة

b. كمية الحركة

c. الطول الموجي

إتقان حل المسائل

53. ما طول موجة دي برولي لإلكترون يتحرّك بسرعة 3.0×10^{6} m/s؟

54. ما السرعة المتجهة التي يجب أن يتحرك فيها الإلكترون ليكون طول موجة دي برولي المصاحبة له 3.0×10^{-10} m؟

55. يتسارع إلكترون في أنبوبة أشعة مهبطية من السكون خلال فرق جهد قدره 5.0×10^{3} V.

a. ما السرعة المتجهة للإلكترون؟

b. ما الطول الموجي للإلكترون؟

56. إذا كانت طاقة حركة إلكترون ذرة هيدروجين 13.65 eV.

a. أوجد السرعة المتجهة للإلكترون.

b. احسب طول موجة دي برولي للإلكترون.

c. إذا كان نصف قطر ذرة الهيدروجين يساوي 0.519 nm. فاحسب محيط ذرة الهيدروجين وقارنه بطول موجة دي برولي لإلكترون الذرة.

57. **ترتيب** رتب الجسيمات التالية ترتيبًا تنازليًا من الأكبر إلى الاصغر تبعًا لطول موجة دي برولي لكل منها. أشر إلى أي ربط ممكن.

A. إلكترون سرعته 300 m/s

B. إلكترون سرعته 500 m/s

C. بروتون سرعته 3 m/s

D. إلكترون سرعته 500 m/s

58. إذا كان طول موجة دي برولي لإلكترون 0.18 nm.

a. ما مقدار فرق الجهد الذي يتعرّض له إذا بدأ من السكون؟

b. إذا كان طول موجة دي برولي لبروتون يساوي 0.18 nm. فما مقدار فرق الجهد الذي يتعرض له إذا بدأ من السكون؟

تطبيق المفاهيم

59. وضع قضيبين من الحديد في النار، فتوهج إحداهما بلون أحمر داكن، بينما توهج الآخر بلون برتقالي ساطع.

a. أيهما أكثر سخونة؟

b. أيهما يشع طاقة أكبر؟

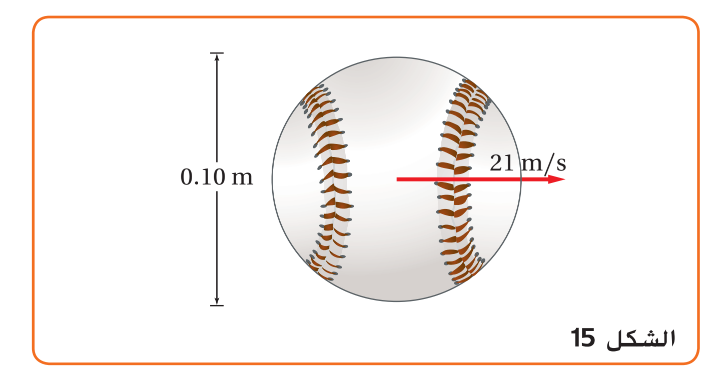
60. هل يبعث الضوء عالي التردد عددًا من الإلكترونات أكبر مما يبعثه الضوء منخفض التردد عند سقوطهما على سطح حساس للضوء، بافتراض أنّ كلا الترددين أكبر من تردد العتبة وشدتيهما متساوية؟

61. يمكن أن يبعث البوتاسيوم إلكترونات ضوئية عند تعرضه للضوء الأزرق في حين يتطلب التنغستين إشعاعًا فوق بنفسجي ليبعث إلكترونات ضوئية.

a. أي من الفلزين له تردد عتبة أكبر؟

b. أي من الفلزين له دالة شغل أكبر؟

62. قارن بين طول موجة دي برولي لكرة البيسبول الموضّحة في **الشكل 15** وقطرها. (علمًا بأن كتلة كرة البيسبول 0.145kg)



الشكل 15

مراجعة عامة

63. ما طاقة الحركة القصوى للإلكترونات الضوئية المنبعثة من فلز إذا كان جهد إيقافها 3.8 V؟

64. إذا كان تردد العتبة لأحد الفلزات 8.0×10^{14} Hz. احسب دالة الشغل للفلز؟

65. إذا سقط ضوء تردده 1.6×10^{15} Hz على الفلز في المسألة السابقة، فما طاقة الحركة القصوى للإلكترونات الضوئية؟

66. أوجد طول موجة برولي للديوترون (النظير ^{2}H للهيدروجين)؛ الذي كتلته 3.3×10^{-27} kg ويتحرّك بسرعة قدرها 2.5×10^{4} m/s.

67. إذا كانت دالة الشغل لقطعة حديد 4.7 eV.

a. ما طول موجة العتبة له؟

b. يتعرّض الحديد لإشعاع طوله الموجي يساوي 150 nm. ما طاقة الحركة القصوى للإلكترونات المنبعثة بوحدة eV؟

68. إذا كانت دالة الشغل للباريوم 2.48 eV. ما أكبر طول موجي للضوء الذي يجعل الإلكترونات تتحرر من الباريوم؟

التقويم

69. طول موجة دي برولي لإلكترون ما 400.0 nm، وهو أقصر طول موجي للضوء المرئي.

a. أوجد السرعة المتجهة للإلكترون.

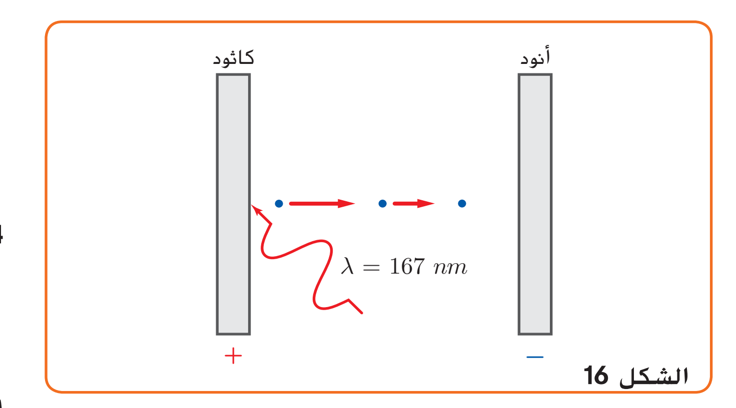
b. احسب طاقة الإلكترون بوحدة eV.

70. يسقط إشعاع على القصدير كما هو موضّح في **الشكل 16**. فإذا كان تردد العتبة للقصدير 1.2×10^{15} Hz فما مقدار:

a. طول موجة العتبة للقصدير.

b. دالة الشغل للقصدير.

c. الطول الموجي للإشعاع الكهرومغناطيسي الساقط مبيَّن في **الشكل 16**. ما طاقة حركة الإلكترونات المنبعثة بوحدة eV؟



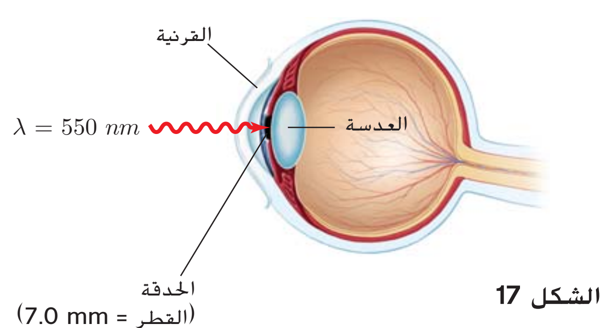
الشكل 16

التفكير الناقد

71. طبّق المفاهيم يدخل ضوء مرئي شدته $1.5\times10^{-11}\ W/m^2$ بصعوبة إلى عين أحد الأشخاص كما هو موضّح في **الشكل 17**.

a. إذا دخل هذا الضوء إلى عين الشخص مارًا ببؤبؤ عينه، فما القدرة التي تدخل عين الشخص بوحدة الواط؟

b. استخدم الطول الموجي للضوء الساقط والمعلومات المُوضّحة في **الشكل 17** لحساب عدد الفوتونات في التي تدخل العين في كل ثانية.



الشكل 17

72. طرح مسألة أكمل هذه المسألة بحيث يجب حلها باستخدام دالة الشغل: "يسقط ضوء طوله الموجي 443 nm على فلز غير معروف ..."

73. إنشاء الرسوم البيانية واستخدامها أكمل طالب تجربة التأثير الكهروضوئي وسجّل جهد الإيقاف كدالة للطول الموجي، كما هو موضّح في **الجدول 2**. وكان مهبط الخلية الضوئية من الصوديوم. مثّل بيانيًا جهد الإيقاف مقابل التردد. واستخدم الآلة الحاسبة لرسم أفضل خط مستقيم. ومن خلال الميل ونقطة التقاء الخط المستقيم، أوجد دالة الشغل وطول موجة العتبة وقيمة h/e من هذه التجربة. قارن قيمة h/e بالقيمة المقبولة.

الجدول 2 جهد الإيقاف مقابل الطول الموجي للصوديوم

λ (nm)	ΔV_0 (V)
200	4.20
300	2.06
400	1.05
500	0.41

74. مسألة معكوسة اكتب مسألة فيزيائية تتضمن أجسامًا حقيقية بحيث تُمثّل المعادلة التالية جزءًا من حلها:

$$\lambda = \frac{6.63\times10^{-34}\ J\cdot s}{1.19\times10^{-27}\ kg\cdot m}$$

الكتابة في الفيزياء

75. أعدّ بحثًا عن جسم كتلي ضخم تأثر في التداخل. صِف تجربة حول ذلك، وطريقة حدوث التداخل.

مراجعة تراكمية

76. انضغط نابض لعبة بمقدار 15 cm عندما وقف عليه طفل وزنه 400.0 N. ما مقدار ثابت الزنبرك لهذا الزنبرك؟

77. تُصدر مجموعة موسيقية نغمة منخفضة في يوم بارد. لماذا؟

78. تتعرّض شحنة قدرها 8.0×10^{-7} C لقوة تساوي 9.0 N عند وضعها على مسافة 0.02 m من شحنة ثانية. ما قيمة الشحنة الثانية؟

79. يشتري صاحب منزل دزينة مجموعات متماثلة من المصابيح الكهربائية بجهد 120 V. تحتوي كل مجموعة على 24 مصباحًا متصلًا على التوالي، ومقاومة كل مصباح 6.0 V. احسب الحمل الكلي بوحدة الأمبير إذا شغّل صاحب المنزل كل المجموعات من مقبس خارجي واحد.

80. إذا كانت القوة المؤثرة في سلك طوله 1.2 m تساوي 1.1×10^{-3} N. ويتعامد السلك مع المجال المغناطيسي للأرض. ما مقدار التيار الموجود في السلك؟

الوحدة 9 تدريب على الاختبار المعياري

الاختيار من متعدد

1. تنبعث فوتونات من ليزر الهليوم – النيون بطول موجي يساوي 632.8 nm. ما مقدار طاقة كل فوتون منبعث من الليزر بوحدة الجول؟

A. 3.135×10^{-19} J
B. 8.231×10^{-17} J
C. 2.546×10^{8} J
D. 1.639×10^{34} J

2. ما دالة الشغل للفلز؟

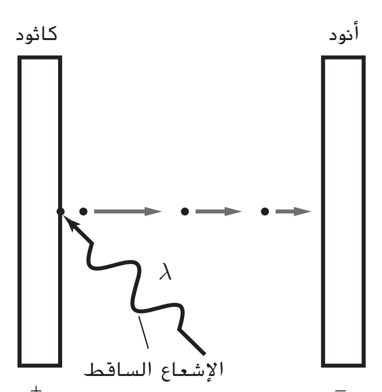
A. مقياس لكمية الشغل الذي يمكن أن يبذله الإلكترون المنبعث من الفلز
B. تساوي تردد العتبة
C. الطاقة اللازمة لتحرير الإلكترون الداخلي(أقرب إلى النواة) في ذرة الفلز
D. الطاقة اللازمة لتحرير الإلكترون الأضعف ارتباطًا بالنواة في ذرة الفلز

3. كيف يرتبط تردد العتبة بالتأثير الكهروضوئي؟

A. يمثّل أدنى تردد للإشعاع الساقط اللازم لتحرير الذرات من مصعد خلية ضوئية.
B. يمثّل أقصى تردد للإشعاع الساقط اللازم لتحرير الذرات من مصعد خلية ضوئية.
C. يمثّل تردد الإشعاع الساقط الذي تتحرر الإلكترونات عند ترددات أقل منه.
D. يمثّل أدنى تردد للإشعاع الساقط اللازم لتحرير الإلكترونات من الذرة.

4. يسقط إشعاع طاقته تساوي 5.17 eV على خلية ضوئية، كما هو موضّح أدناه. إذا كانت دالة الشغل للخلية الضوئية تساوي 2.31 eV. فما مقدار طاقة الإلكترون الضوئي المنبعث؟

A. 0.00 eV
B. 2.23 eV
C. 2.86 eV
D. 7.48 eV



5. إذا كان تردد فوتون 1.14×10^{15} Hz. ما مقدار طاقة الفوتون؟

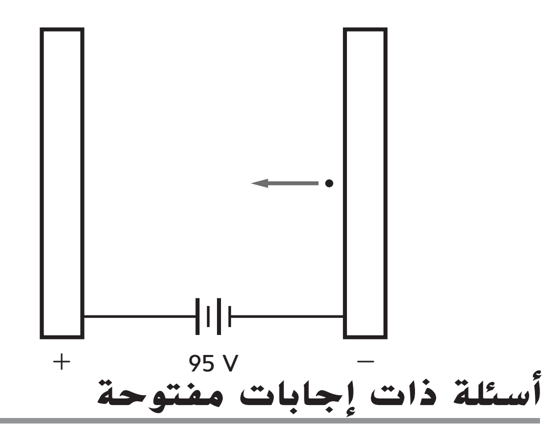
A. 5.82×10^{-49} J
B. 7.55×10^{-19} J
C. 8.77×10^{-19} J
D. 1.09×10^{-12} J

6. ما طول موجة دي برولي لإلكترون يتحرّك بسرعة 391 km/s؟ **إذا كانت** كتلة الإلكترون 9.11×10^{-31} kg.

A. 3.52×10^{-25} m
B. 4.79×10^{-15} m
C. 4.27×10^{-15} m
D. 1.86×10^{-9} m

7. يتسارع إلكترون خلال فرق جهد قدره 95.0 V؛ كما هو مبين في الشكل أدناه. ما طول موجة دي برولي للإلكترون؟

A. 5.02×10^{-22} m
B. 1.26×10^{-10} m
C. 2.52×10^{-10} m
D. 5.10×10^{6} m



أسئلة ذات إجابات مفتوحة

8. يبلغ طول موجة دي برولي لجسم ما 2.3×10^{-34} m عندما تكون سرعته المتجهة 45 m/s. ما مقدار كتلة الجسم بوحدة الكيلوجرام؟

9. يُعدّ المجهر الإلكتروني مفيدًا حيث يُمكن جعل أطوال موجة دي برولي للإلكترونات أصغر من الطول الموجي للضوء المرئي. ما مقدار الطاقة بوحدة الإلكترون فولت اللازم منحها لإلكترون ليُصبح طول موجة دي برولي له 20.0 nm؟

شكر و تقدير

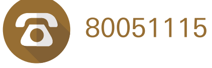
نسخة الطلاب

Photo: vii (t)McGraw-Hill Education, (bl)McGraw-Hill Education, (br)McGraw-Hill Education; x Glow Images; xi Roberto Caucino/Shutterstock.com; xiii Source: NASA GSFC image by Robert Simmon and Reto Stöckli; xix (cl)Darren Pullman/Shutterstock.com, (cl) Dja65/Shutterstock.com, (cl)Dmitry Naumov/Shutterstock.com, (cl) Ingram Publishing/Alamy Stock Photo, (cl)C Squared Studios/Getty Images, (cw t-b)Casey Lee/E+/ Getty Images, (2)xiaoke ma/Getty Images, (3)Heinz Hemken/iStock/ Getty Images, (4)I Dream Stock/ SuperStock, (5)Methanon/Shutterstock.com, (6)Vit Kovalcik/iStock/ Getty Images, (7)Ingram Publishing/SuperStock, (8)Ryan McVay/ Photodisc/Getty Images, (9)C Squared Studios/Getty Images, (10)Hutchings Photography/Digital Light Source, (11)Image Source/ Alamy, (12)McGraw-Hill Education, (13)Ryan McVay/Getty Images, (14) Ken Karp/McGraw-Hill Education, (15)Stockbyte/Getty Images; xviii (t)Fuse/Getty Images, (b)Jiro Mochizuki/Image of Sport/Newscom; xx (t)James LauritzDigital Vision/ Getty Images; xxi Dynamic Graphics Value/SuperStock; **156-157** Jon Wild/Flickr/Getty Images; **158** NASA; **160** Astronomy NASA Space/Alamy; **166** Image Source; **175** Digital Vision/Getty Images; **182-183** imageshop/PunchStock; **184** (t)Lumppini/Shutterstock.com, (bl)©Comstock Images/Alamy, (br) Zenith Dsouza/Shutterstock.com; **185** (t)North Wind Picture Archives/Alamy, (bl)sciencephotos/ Alamy Stock Photo, (bc)GIPhotoStock/Science Source, (br)GIPhotoStock/Science Source; **189** (t)William Andrew/Flickr/Getty Images, (b)Andrew Lambert Photography/ Science Source; **190** Hutchings Photography/Digital Light Source; **192** (t)Carol Wolfe, (inset)Ainsley E Seago/2008 The Royal Society; **193** (t)Getty Images, (bl)sciencephotos/Alamy Stock Photo, (bc) Ted Kinsman/Science Source, (br) Ted Kinsman/Science Source; **196** GIPhotoStock X/Alamy; **197** (t) Getty Images, (inset)Michael W. Davidson/Science Source; **198** (l) GIPhotoStock/Photo Researchers, (r)GIPhotoStock/Science Source; **200** Hutchings Photography/Digital Light Source; **202** Thorsten Hofmann/age fotostock, (bkgd) Maximilian Stock Ltd/age fotostock; **208-209** RealCG Animation Studio/Shutterstock.com; **210** (t) Peter Hermus/iStock/Getty Images Plus/Getty Images, (bl)Hutchings Photography/Digital Light Source, (br)Hutchings Photography/Digital Light Source; **214** Dieter Möbus/ Age Fotostock; **217** McGraw-Hill Education; **223** Science Photo Library RF/Getty Images; **MS-00** Photodisc/Getty Images; **000** Compliments of the United Arab Emirates Ministry of Education.


إكسبو 2020 دبي
الإمارات العربية المتحدة
والعلوم
تحت شعار تواصل العقول وصنع المستقبل ، حظيت دولة الإمارات العربية المتحدة بشرف استضافة إكسبو 2020 دبي، وهذه هي المرة الأولى التي يقام فيها إكسبو دولي في منطقة الشرق الأوسط وأفريقيا وجنوب آسيا، وتعتبر معارض إكسبو الدولية من أكبر وأهم الأحداث العالمية، وذلك منذ أول معرض في العام 1851 الذي عُرِف باسم المعرض العظيم.
ابحث في موقع إكسبو 2020 عن افكار جديدة للتنقل والتكنولوجيا، ثم اعقد مع مجموعة من زملائك جلسة عصف ذهني للوصول إلى أفكار مبتكرة.
حان الوقت لتتعرف على مستقبل التّنقّل

مركز اتصال وزارة التربية والتعليم

اقتراح - استفسار - شكوى

 80051115  04-2176855  ccc.moe@moe.gov.ae  www.moe.gov.ae